

## INFLUENCIA EN LA VIDA A FATIGA DE LA PRECENCIA DE REBABA EN LA INTERCARA EN UNIONES HIBRIDAS ALUMINIO-CFRP REMACHADAS

C. Valvellano<sup>(1,\*),</sup> J. Domínguez<sup>(1),</sup> A. Portal<sup>(2),</sup> P. Arroyo<sup>(2)</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación. E.T.S. de Ingeniería. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos s/n. 41092 Sevilla (Spain) Tel.: +34 954 487311, (\*) Correo-e: [carpofofor@us.es](mailto:carpofofor@us.es)

<sup>2</sup> Department of Materials, Processes and Metrology Operations Quality. AIRBUS D&S, Sevilla (Spain).

### RESUMEN

Las uniones remachadas híbridas de metal-composite se usan extensivamente en aeronáutica. El presente trabajo presenta un estudio experimental sobre la influencia en la resistencia a fatiga de la existencia de la rebaba del taladrado en uniones AA2024-T42 – CFRP con remaches ciegos ABS 0257. Se han analizado tres tipologías de probetas: de baja (LLT), de media (MLT) y de alta (HLT) capacidad de transferencia de carga. Se observa que las zonas y mecanismos de iniciación de las grietas dependen del tipo de probeta y del nivel de carga empleada, permitiendo explicar el grado de influencia de la rebaba de intercara en la vida de la unión.

### ABSTRACT

Riveted joints metal-composite hybrid are extensively used in aeronautics. This paper presents an experimental study on the influence in fatigue strength of the existence of any burrs from drilling in AA2024-T42 - CFRP stacks joined with blind rivets ABS 0257. Three types of specimens with low (LLT), middle (MLT) and high (HLT) load transfer capability have been analyzed. It is shown that the areas and mechanisms of initiation of cracks depend on the specimen type and the load level, allowing explaining the degree of influence of the burr of interface in the life of the hybrid joint.

**PALABRAS CLAVE:** Unión híbrida metal/CFRP, Rebaba en intercara, Vida a fatiga.

### 1. INTRODUCCIÓN

La creciente automatización de los procesos de unión en la industria aeronáutica conlleva que algunas operaciones que regularmente se realizan en el remachado manual no se puedan llevar a cabo. Este es el caso de las operaciones de desbarbado, limpieza e inspección de la intercara de las piezas a unir, justo después de taladrar y antes de remachar. Así, para cualificar industrialmente dichos procesos, cualquier eventual defecto que pueda quedar entre ambas piezas debe ser cuantificado y su efecto en la vida en servicio del componente caracterizado.

Las uniones remachadas metal-metal y las híbridas de metal-composite se usan extensivamente en aeronáutica. De las primeras existe en la literatura numerosos estudios de su comportamiento a fatiga en diferentes situaciones [1-3], estando algunas configuraciones cualificadas industrialmente. Sin embargo, en el caso de las segundas los trabajos son más escasos, en algunos casos preliminares [4] o centrados en configuraciones de usos en otras industrias [5,6].

El presente trabajo presenta un estudio experimental sobre la influencia en la resistencia a fatiga de la existencia de la rebaba del taladrado en uniones híbridas AA2014-T42 – CFRP con remaches ciegos ABS 0257. Se han analizado tres tipologías de probetas: de baja (LLT), de media (MLT) y de alta (HLT) capacidad de transferencia de carga. Se observa que las zonas y mecanismos de iniciación de las grietas dependen del tipo de probeta y del nivel de carga empleada, permitiendo caracterizar el grado de influencia de la rebaba de intercara en la vida de la unión.

### 2. PLAN DE ENSAYOS

El plan de ensayos contempla el análisis de la vida fatiga de tres grupos de probetas híbridas remachadas de manera que permitan diferente distribución de cargas a través de las láminas de metal y de CRFP. Para cada tipología se comparan los resultados de dos tipos probetas, aquellas fabricadas en condiciones óptimas frente a otras en las que se indujo la presencia de una rebaba a la salida del taladro en la lámina de aluminio. Dicha rebaba queda atrapada en la intercara aluminio-CFRP.

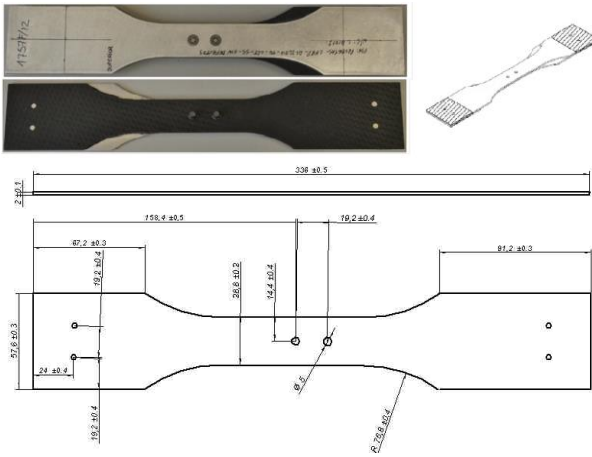


Fig. 1. Geometría de probetas LLT.

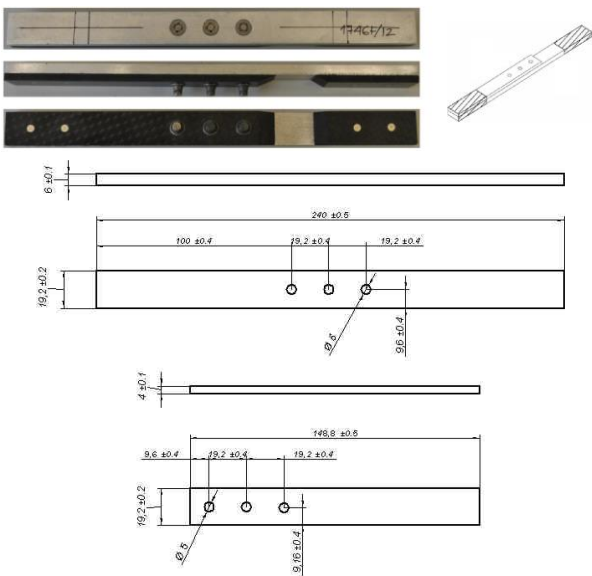


Fig. 2. Geometría de probetas MLT.

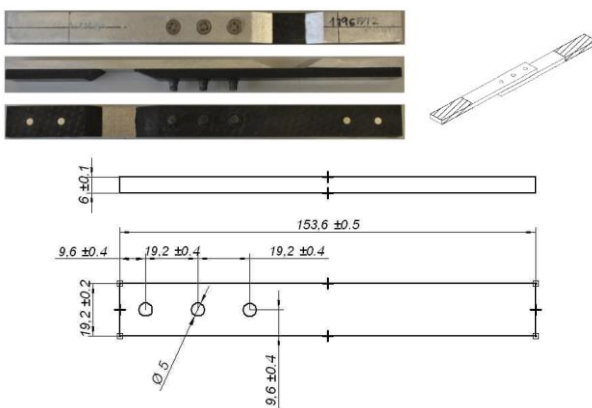


Fig. 3. Geometría de probetas HLT.

### 2.1. Tipología de probetas

Se han empleado tres tipos de probetas diferenciadas según su capacidad de transferencia de carga, denominadas respectivamente LLT (Low Load Transfer), MLT (Medium Load Transfer) y HLT (High

Load Transfer). Las Figs. 1, 2 y 3 muestran la geometría y dimensiones de dichas probetas.

El material metálico empleado es AA 2024 T42 CLAD en láminas de espesor 2 mm para las probetas LLT y 6 mm en las MLT y HLT. En todos los casos la dirección de laminación se hizo coincidir con la dirección longitudinal de la probeta.

La lámina de CFRP está formada por prepregs de fibra de carbono Z-19.742 y matriz de resina epoxy. Los prepregs se dispusieron en direcciones alternas de 0°, 45°, 90°, -45° para obtener un laminado final con propiedades cuasi-isótropas. Los espesores de los laminados para las distintas probetas fueron 2 mm (LLT), 4 mm (MLT) y 6 mm (HLT).

La unión de ambas láminas se hizo a través de remaches ciegos tipo ABS0257 (Composi-lok MBF2113-6), empleando sellante de interposición Z-16.101.

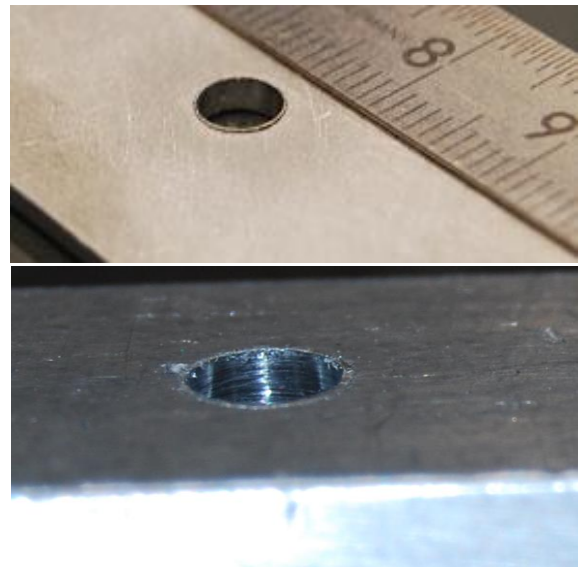


Fig. 4: Detalle de la rebaba inducida en las probetas: probeta LLT (arriba) y HLT (abajo).

### 2.2. Probetas de referencia y con rebaba

Para el análisis descrito se fabricaron dos grupos de probetas: unas probetas de referencia, que denominaremos en adelante “sin rebaba”, y unas probetas “con rebaba”. En las primeras, tras la fase de taladrado del conjunto se procedió a la limpieza de la intercara y al rebabado del borde del agujero, para su posterior sellado y remachado. El taladrado se realizó en dos etapas: un taladro previo a 4,8 mm de diámetro y otro al diámetro definitivo de 5,05 mm. En las segundas, las condiciones de taladrado se alteraron para conseguir una rebaba apreciable en el agujero y no se realizó limpieza de la intercara. La Fig. 4 muestra un detalle de la rebaba obtenida. La altura de la rebaba fue medida al microscopio observándose valores de  $170 \pm$

20  $\mu\text{m}$  (HLT),  $180 \pm 20 \mu\text{m}$  (MLT) y  $190 \pm 15 \mu\text{m}$  (LLT).

2.3. Condiciones de carga.

Los ensayos de fatiga se llevaron a cabo en una máquina de ensayos universal MTS 810 con capacidad de carga de  $\pm 100 \text{ kN}$ .

Para la obtención de las curvas de vida a fatiga para cada tipo de probeta se eligieron al menos 5 niveles de carga, repartiendo un mínimo de 10 probetas a lo largo de los mismos. Se estableció inicialmente un run-out de 700.000 ciclos. La relación de carga fue  $R=0.1$ , y la frecuencia de ensayo se fijó en 7 Hz para fuerzas máximas inferiores a 20 kN y 5 Hz para el resto de casos. La Fig. 5 muestra un detalle del montaje de las probetas durante los ensayos.

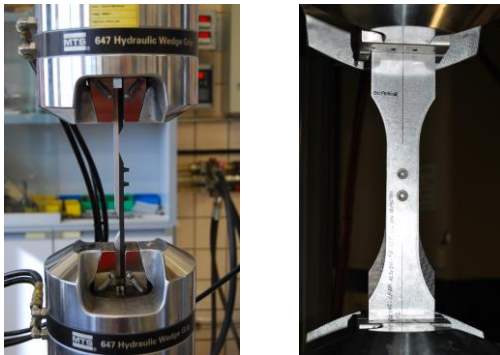


Fig. 5. Montaje de probetas LLT durante los ensayos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presenta el estudio comparativo de la vida a fatiga para cada tipo de probeta ensayada y los modos de fallo observados. Se presenta de mayor a menor capacidad de transferencia de carga, esto es, HLT, MLT y LLT.

Tabla 1. Cargas máximas aplicadas y número de ensayos realizados en cada nivel para las probetas HLT.

Carga Máx. [kN]	# Ensayos sin / con
11,0	1 / 1
9,0	2 / 2
7,6	3 / 3
7,0	3 / 3
6,5	1 / 1

3.1. Probetas HLT.

Para las probetas HLT los niveles de carga y distribución de probetas en cada nivel se muestran en la Tabla 1. La Fig. 6 muestra las curvas Fuerza máxima ( $F_{max}$ ) frente a número de ciclos ( $N$ ) obtenidas para las probetas de referencia (*sin rebaba*) y las probetas con rebaba. Debido a la dispersión de los ensayos en los

niveles de carga bajos se extendió el run-out hasta los  $2 \cdot 10^6$  ciclos. Como era de esperar, el fallo se produjo en todos los casos por la rotura de la lámina de aluminio, donde las grietas se iniciaron preferentemente en el remache más externo, esto es, el más cargado de los tres.

Se puede observar que, para los niveles ensayados, la presencia de rebaba aumenta la vida a fatiga. Este efecto beneficioso de la rebaba parece ser debido a un cambio en el mecanismo de fallo entre ambos tipos de probetas.

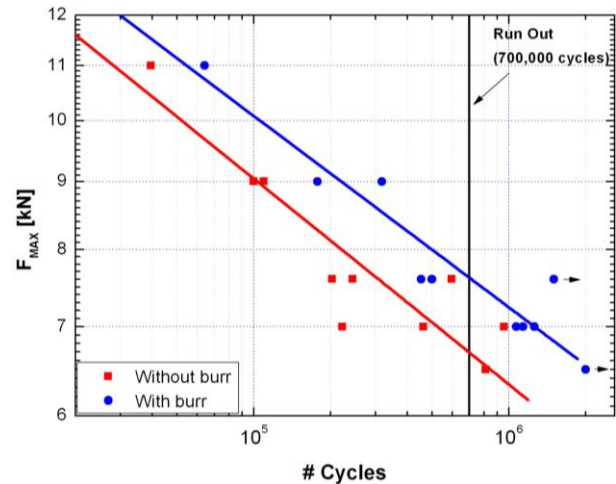


Fig. 6. Evolución de la vida a fatiga a distintos niveles de fuerza máxima ( $R=0,1$ ) para especímenes HLT.

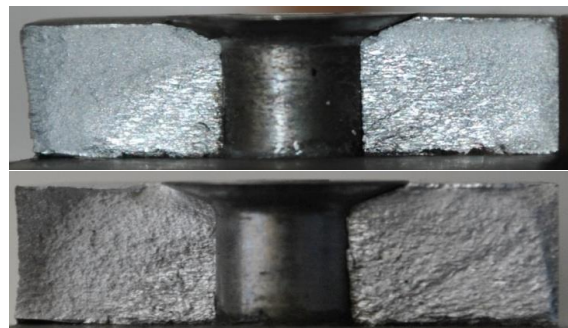


Fig. 7. Fractografía en probetas HLT *sin rebaba* a 7,6 KN (arriba) y 7,0 KN (abajo).

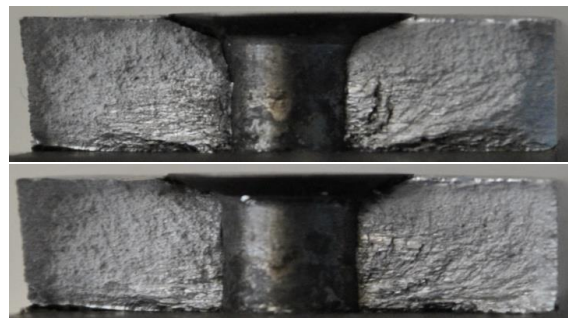


Fig. 8. Fractografía en probetas HLT con rebaba a 9,0 KN (arriba) y 7,6 KN (abajo).

Así, para las probetas sin rebaba el mecanismo de fallo es claramente la fatiga por fretting en la intercara Aluminio-CFRP como se observa en las fractografías de la Fig. 7., preferentemente en la esquina del agujero del taladro, cuya concentración de tensiones potencia la iniciación de la grieta. Resultados similares han sido observados en probetas HTL metal-metal [1].

En cambio, para probetas con rebaba se aprecia como la zona de iniciación tiende a encontrarse a lo largo del agujero del taladro, véase Fig. 8. Esto hace pensar que la rebaba ha servido de anclaje de la intercara reduciendo el efecto dañino del fretting y dejando que sea la concentración de tensiones del agujero la característica que controla la iniciación de las grietas, favorecido además por el fretting con el remache.

3.2. Probetas MLT.

Para las probetas MLT los niveles de carga y la distribución de probetas ensayadas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Cargas máximas aplicadas y número de ensayos realizados en cada nivel para las probetas MLT.

Carga Máx. [kN]	# Ensayos sin / con
29,1	1 / 1
22,5	2 / 2
17,5	3 / 3
14,5	4 / 3
12,8	1 / 1
10,0	1 / 0

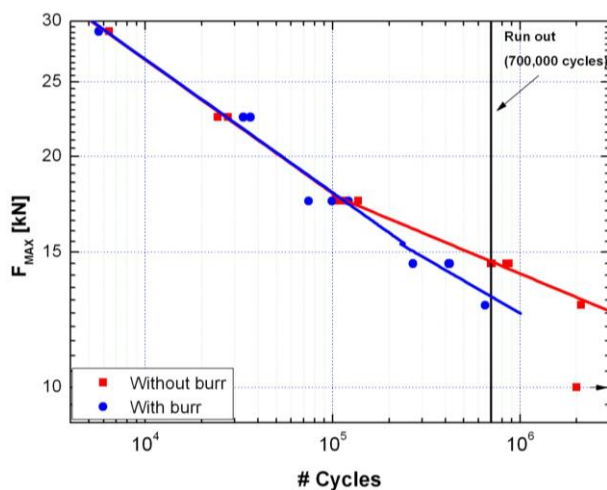


Fig. 9. Evolución de la vida a fatiga a distintos niveles de fuerza máxima (R=0,1) para especímenes MLT.

Las curvas de Fuerza máxima ( $F_{max}$ ) frente a número de ciclos ( $N$ ) obtenidas para las probetas sin y con rebaba se presentan en la Figura 9. Al igual que en las probetas HTL, las grietas se iniciaron en la lámina de aluminio y preferentemente en el remache más cargado.

Se observan claramente dos comportamientos diferentes dependiendo del rango de carga. Así para cargas altas se aprecia que la iniciación de la grieta se produce hacia la mitad de la longitud del agujero, controlada probablemente por la concentración de tensiones del mismo y asistida por el fretting con la caña del remache. La Fig. 10 muestra sendas fractografías de una probeta sin y con rebaba para un nivel de carga de 22.5 kN donde se puede observar la similitud entre ambas en cuanto al mecanismo de iniciación de la grieta.

El patrón anterior se mantiene también para las probetas sin rebaba en el rango de cargas bajas. Sin embargo, en el caso de probetas con rebaba la vida a fatiga se reduce casi a la mitad, sugiriendo un mecanismo de fallo algo distinto.

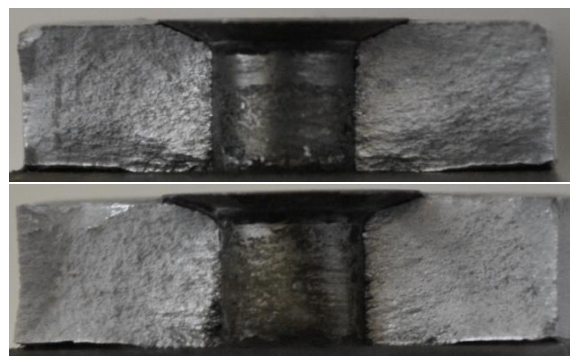


Fig. 10. Fractografía en probetas MLT sin rebaba (arriba) y con rebaba (abajo) a 22,5 kN.



Fig. 11. Fractografía en probetas MLT sin rebaba (arriba) y con rebaba (abajo) a 14,5 kN.

En efecto, la Fig. 11 muestra la fractografía de dos probetas sin y con rebaba. No existe una clara diferencia entre ambas factografías, excepto por el hecho de que la presencia de la rebaba hace que dicha región sirva como zona de iniciación secundaria de inicio de grietas por fretting fatiga. A diferencia que con las probetas HTL, la rebaba no parece ahora anclar de forma eficaz la intercara. Debe recordarse que los niveles de carga globales son muy superiores en las probetas MLT que en las HTL, lo que hace suponer que la carga transferida a través de la lámina de aluminio sea mayor en la primera que en la última. Un análisis más detallado de la transferencia de carga en ambas probetas permitirá cuantificar y constatar el origen de tales diferencias.

3.3. Probetas LLT.

En el caso de las probetas LLT, los niveles de carga y probetas ensayadas se muestran en la Tabla 3. Se debe recordar que en este caso el espesor de la lámina de aluminio es de sólo 2 mm, a diferencia de los 6 mm empleados en las probetas MLT y HLT. A pesar de esto, los niveles de carga soportados para alcanzar vidas a fatigas similares a la de los ensayos anteriores son del orden de los de las probetas MLT.

Tabla 3. Cargas máximas aplicadas y relación de ensayos a realizar en cada nivel para las probetas LLT.

Carga Máx. [kN]	# Ensayos sin / con
33,9	1 / 0
28,0	2 / 2
21,9	3 / 3
17,0	2 / 2
14,0	3 / 3
12,0	2 / 2

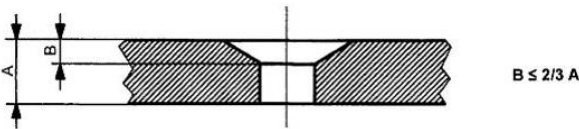


Fig. 12.- Recomendación dimensiones de avellanado.

En este caso la rotura surgió indistintamente en ambos remaches, aunque con cierta preferencia por el remache más próximo a la mordaza inferior (mordaza móvil). Dado reducido espesor la probeta la longitud del taladro, una vez descontado el avellanado, es muy reducida (aprox. 0.67 - 1 mm). Aunque esto cumple con las recomendaciones de los procedimiento de ejecución de la industria (véase Fig. 12), la exigua sección resistente hace que sea difícil distinguir claramente el mecanismo de iniciación.

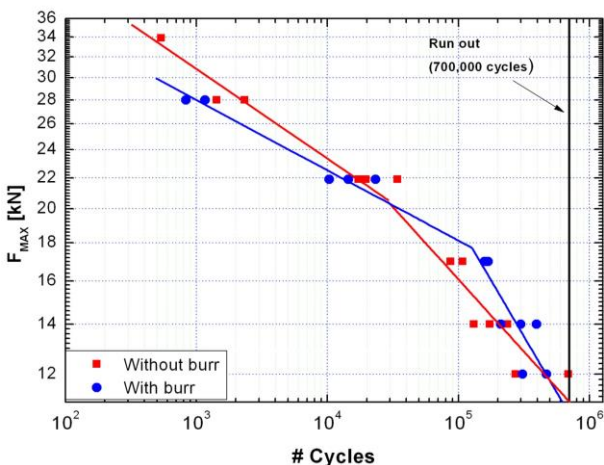


Fig. 13. Evolución de la vida a fatiga a distintos niveles de fuerza máxima (R=0,1) para especímenes LLT.

La Fig. 13 presenta las curvas  $F_{max} - N$  obtenidas para probeta sin y con rebaba. Como se puede observar la posición relativa de ambas curvas se van intercambiando a medida que la carga disminuye. Así para valores de carga altos la presencia de rebaba parece reducir ligeramente la vida a fatiga, mientras que esta tendencia se invierte para niveles de carga intermedios, y ambas curvas terminan casi confundiendo para niveles bajos.

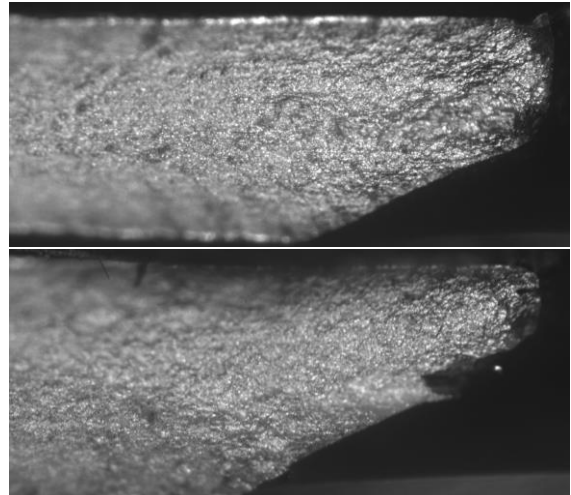


Fig. 14. Fractografía en probetas LLT sin rebaba (arriba) y con rebaba (abajo) a 28,0 kN.

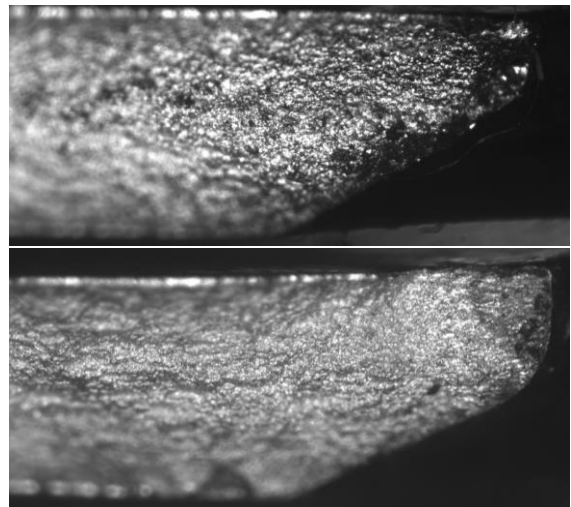


Fig. 15. Fractografía en probetas LLT sin rebaba (arriba) y con rebaba (abajo) a 14,0 kN.

Los estudios de Park & Grandt [1] sobre uniones LLT metal-metal ponen de manifiesto la existencia de puntos de iniciación indistintamente a lo largo del agujero del taladro como en la base del avellanado en probetas de la misma serie. Las Figs. 14 y 15 muestran las factografías correspondientes un nivel alto de carga (28,0 kN) y otro bajo (14,0 kN) para los casos sin y con rebaba. Como se ha comentado entre ambos niveles parece invertirse el comportamiento a fatiga. No obstante, a la vista de las factografías no es posible apreciar en ningún caso una clara diferencia a efectos de zona y/o mecanismo de

inicio de grieta. La reducida altura del taladro hace que a los aumentos de análisis (x20) no se aprecie más que las grietas se inician a lo largo de éste, probablemente asistidas por la concentración de tensiones del agujero y el fretting con el remache, pasando la rebaba a un segundo plano a efectos prácticos. Un análisis microscópico más detallado, p.e. con microscopía electrónica de barrido (SEM) permitiría identificar mejor las zonas y mecanismos de inicio.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis comparativo de la influencia en la vida a fatiga de la presencia de rebaba en la intercara de probetas híbridas Aluminio-CFRP unidas con remache ciegos. Dicho análisis se ha realizado sobre tres configuraciones de probetas diferenciadas por su capacidad de transferir carga a través del metal (HLT, MLT y LLT). Las conclusiones obtenidas para cada tipo de configuración se resumen como sigue:

- Para las probetas HLT, la presencia de la rebaba tiene un efecto beneficioso en la vida a fatiga de la unión. El origen parece deberse a que, para los niveles de cargas ensayados, la rebaba es capaz de anclar localmente la intercara y reducir el efecto del fretting en dicha zona, retrasando la iniciación de grietas por fatiga respecto de los casos sin rebaba.
- Para las probetas MLT, se distinguen dos comportamientos distintos según los niveles de carga. Para niveles altos el efecto de la rebaba en la vida a fatiga es inapreciable. Sin embargo, para niveles bajos de carga, la rebaba reduce la vida de la unión. A diferencia de los que ocurría con las probetas HLT, los mayores niveles de carga empleados en los ensayos con probetas MLT hace que el posible efecto de anclaje de la intercara no sea ahora tan eficaz como en el caso anterior.
- Para las probetas LLT, no ha sido posible establecer un patrón claro del efecto de la rebaba. En las probetas ensayadas, la reducida sección de taladro que queda en la chapa de aluminio tras el avellanado hace que no se identifique claramente la zona de iniciación de las grietas. En cualquier caso las pequeñas diferencias entre las curvas de fatiga en los casos sin y con rebaba permite concluir que, para dichas probetas y niveles de carga, el efecto de la rebaba parece ser secundario.

Un estudio de detalle de los niveles de transferencia de carga de las distintas probetas, así como un estudio por microscopía electrónica permitiría identificar mejor los mecanismos de inicio de las grietas en presencia o no de rebaba. No obstante, su efecto en términos macroscópicos o ingenieriles puede ser claramente caracterizado por el plan de ensayos propuesto.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a AIRBUS D&S y al Ministerio de Economía y Competitividad por el soporte económico a través de los proyectos MTQM-T-201010-S1 (PI-0871/2011) y DPI2012-32913. Así mismo, se agradece a Dña. Mercedes Fernández Morales su asistencia e implicación en la ejecución del plan de ensayos.

#### REFERENCIAS

- [1] C.Y. Park, A.F. Grandt Jr, A proposed fatigue test protocol for generic mechanical joints, *Engineering Failure Analysis* **13** (1), 135–154, 2006.
- [2] Y. Liu, X. He, X. Shao, J. Liu, Z. Yue, Analytical and experimental investigation of fatigue and fracture behaviors for anti-double dog-bone riveted joints, *Engineering Failure Analysis* **17**, 447–1456, 2010.
- [3] X. Yuan, Z.F. Yue, S.F. Wen, L. Li, Experimental and analytical investigation of fatigue and fracture behaviors for scarfed lap riveted joints with different lap angle, *Engineering Failure Analysis* **33**, 505–516, 2013.
- [4] D. W. Jung, N.S. Choi, Characteristic fracture assessment of a rivet joint for hybrid composite laminates under static and fatigue shear loads, *Key Engineering Materials* **326-328 II**, 1757-1760, 2006.
- [5] G.D. Franco, L. Fratini, A. Pasta, Fatigue behaviour of self-piercing riveting of aluminium blanks and carbon fibre composite panels, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* **226** (3), 230-241, 2012.
- [6] G. Di Franco, L. Fratini, A. Pasta, V.F. Ruisi, On the self-piercing riveting of aluminium blanks and carbon fibre composite panels, *International Journal of Material Forming* **6** (1), 137-144, 2013.