

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DE DOS ALEACIONES DE ALUMINIO CORTADAS POR PUNZONADO O LÁSER

F. Zapiráin, A. Pelayo y A. M. Irisarri

FUNDACION INASMET  
Mikeletegi Pasealekua, 2. Parque tecnológico  
20009 San Sebastián

**Resumen:** Se ha efectuado un análisis comparativo de la incidencia que ejercen dos procesos de corte (punzonado y láser) y dos estados de acabado final (bruto de corte y matado de los cantos) sobre las prestaciones a fatiga de dos aleaciones de aluminio (2024 y 7475). Los resultados obtenidos demuestran claramente que la incidencia del estado de acabado sobre el comportamiento a fatiga de ambas aleaciones es muy superior a la que ejerce el empleo de uno u otro proceso de corte. La vida a fatiga de las muestras que presentan los bordes matados es notablemente mayor que las que se hallan en estado bruto de corte. Las observaciones metalográficas de las diferentes probetas concuerdan totalmente con los resultados de los ensayos de fatiga puesto que las pertenecientes a muestras en estado bruto de corte exhiben una mayor rugosidad y la existencia de una capa periférica deformada que han acelerado el fallo en el curso del ensayo de fatiga.

**Abstract:** The influence of the cutting process and the finishing condition on the fatigue performance of two aluminium alloys (2024 and 7475) has been studied. Two processes (punching and laser cutting) and two finishing conditions (as cut and chamfered edges) have been analysed. Recorded results show that the effect due to the finishing condition is markedly stronger than that due to the use of one or another cutting process. Fatigue lives of chamfered samples are significantly higher than those in the as cut condition. Metallographic examination of the various samples agree with the mechanical tests results as specimens in the .... condition exhibit rougher surfaces and a deformed layer that have accelerated the failure in the fatigue test.

### 1. INTRODUCCIÓN

La creciente competencia entre las empresas del sector aeronáutico obliga a efectuar el máximo esfuerzo posible para conseguir reducir en la mayor medida posible los costes de producción de los componentes y estructuras. En esta línea se pueden conseguir ahorros por la sustitución de los procesos tradicionales por otros nuevos que incrementen la productividad o por la supresión de alguna operación del proceso de fabricación. Sin embargo, la introducción de modificaciones en el proceso de producción no puede afectar negativamente a la integridad del avión que deberá operar con los requeridos márgenes de seguridad.

Se han introducido una serie de procesos nuevos para el corte y conformado de las chapas destinadas a la fabricación de los componentes de las estructuras aeronáuticas. Entre los primeros se puede citar el corte por láser que está adquiriendo un uso creciente en sustitución del tradicional proceso de punzonado. En esencia este proceso se basa en efectuar el corte por el calor generado por la incidencia de un haz

Entre las ventajas que se han señalado para este proceso se pueden citar la buena calidad de los bordes de los cortes, el hecho de que no sean necesarias herramientas o matrices, el corto tiempo de preparación, el reducido costo y la rapidez de los cambios de diseño y la posibilidad de cortar formas complejas y tridimensionales o de materiales tratados. A favor del proceso de punzonado se han indicado su menor coste para cantidades elevadas de piezas de la misma forma y la capacidad de cortar chapas más gruesas, de hasta unos 13 mm de espesor [1]. Ésta constituye una de las principales limitaciones del corte por láser de chapas de aluminio ya que, debido al alto poder reflector y la elevada conductividad eléctrica de este metal, el espesor máximo que puede ser cortado con éxito por este proceso se reduce a unos 4 mm. Sin embargo, estos inconvenientes tienen una ligera repercusión a la hora de analizar el empleo del corte por láser en la industria aeronáutica ya que, generalmente, las series suelen ser relativamente cortas y los espesores de las chapas empleadas en la producción de componentes por conformado menores que la mencionada cifra. Por tanto, el empleo del láser adquiere un gran interés para esta industria.

Un ahorro adicional se puede lograr si no se realiza ninguna operación entre el corte de las muestras y su conformado, es decir, eliminando el matado de los bordes que se efectúa para eliminar rugosidades y asperezas de los bordes. Sin embargo, no se puede olvidar que las marcas y entallas constituyen puntos propicios para la generación de grietas de fatiga y pueden acortar la vida en servicio del componente por debajo de unos límites admisibles. A ello hay que añadir las tensiones residuales de tracción que pueden quedar en la zona de corte, que también ejercen un efecto negativo sobre la vida a fatiga. La influencia ejercida por las tensiones residuales es más pronunciada en los casos en que las tensiones aplicadas se hallan próximas al límite de fatiga pero se han observado también efectos significativos en condiciones de fatiga de bajo número de ciclos.

La experiencia previa ha demostrado que tanto la condición superficial como las alteraciones que se producen en la misma por efecto de las operaciones de producción ejercen una notable influencia sobre la resistencia a la fatiga de los materiales. Por otra parte, el grado de rugosidad que presentan las superficies de corte tiene una relación directa con el comportamiento a fatiga [2]. Por tanto, es necesario evaluar las ventajas (eliminación de la operación de matado de los bordes con los ahorros de tiempo y dinero que ello conlleva) frente a los inconvenientes que puede acarrear (posible disminución de la vida a fatiga) antes de adoptar una resolución acerca de la posibilidad de alterar el proceso.

El objetivo del presente trabajo es efectuar un estudio comparativo de las prestaciones frente a la fatiga que presentan dos aleaciones de aluminio, cortadas por dos procesos diferentes (punzonado y láser) y en dos estados de acabado diferentes (bruto de corte y matado de bordes)

## 2. TÉCNICA EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales

Los materiales elegidos para este estudio fueron dos chapas delgadas, de 2.5 mm de espesor, de dos aleaciones de aluminio de alta resistencia, pertenecientes a dos series diferentes 2XXX y 7XXX. La primera de ellas corresponde a una aleación 2024 (aluminio - cobre - magnesio - manganeso), que es ampliamente utilizada en estructuras aeronáuticas. En el instante de su recepción esta chapa se encontraba en el estado T3, es decir, solubilizada y deformada en frío, lo que le permite alcanzar unos buenos niveles de resistencia mecánica y de ductilidad, tanto a temperatura ambiente como a baja temperatura [3]. Esta aleación presenta además la ventaja de que no sólo no se produce una disminución de la tenacidad a baja

temperatura sino que ésta llega incluso a superar a la obtenida a temperatura ambiente. La segunda aleación elegida para este estudio es la 7475 (aluminio – cinc – magnesio – cobre), variante de la habitual 7075 cuyos contenidos máximos de hierro y silicio se hallan estrictamente limitados con el fin de mejorar su tolerancia al daño. La chapa de esta aleación había sido sometida a un tratamiento térmico de solubilización y ligera sobremaduración (estado que se designa como T761). Este tratamiento incrementa la resistencia frente a la corrosión por exfoliación y bajo tensión de la aleación, confiriéndole además una mayor tenacidad y mejorando su comportamiento frente a la fatiga en determinadas condiciones, a costa de un cierto sacrificio de su resistencia mecánica en comparación con la que se puede conseguir cuando el tratamiento se efectúa para conseguir la máxima resistencia. La tolerancia al daño de la aleación 7475 en este estado alcanza casi el triple que la de la tradicional 7075, tratada al pico de resistencia (T6).

### 2.2. Proceso de corte

Se obtuvieron una serie de probetas de fatiga a partir de muestras de las chapas que se hallan en diferentes condiciones, tal y como se muestra en la tabla 1.

Ref.	Aleación	Corte	Acabado
A	7475	Punzonado	Borde Matado.
B	7475	Punzonado	Bruto Corte
C	7475	Láser	Borde Matado.
D	7475	Láser	Bruto Corte.
E	2024	Punzonado	Borde Matado.
F	2024	Punzonado	Bruto Corte.
G	2024	Láser	Borde Matado.
H	2024	Láser	Bruto Corte.

**Tabla 1:** Referencias de las probetas pertenecientes a las distintas aleaciones y procesos de corte y acabado.

Las probetas de fatiga, de geometría plana, se mecanizaron a partir de las muestras de chapa en cada una de las diferentes condiciones. Las superficies laterales de estas probetas se dejaron en el mismo estado en que se encontraban tras el proceso de corte y acabado para poder analizar correctamente el efecto que ejercen las variables del proceso de corte sobre la vida a fatiga de las dos aleaciones, evitando el error que se puede cometer si se emplean probetas lisas, pulidas, que ofrezcan una valoración de la vida a fatiga superior a la que poseen los componentes reales.

### 2.3. Ensayos de fatiga

Los ensayos de fatiga se efectuaron bajo tensión uniaxial, con amplitud constante, de acuerdo con los requerimientos de la norma ASTM E-466. Los ensayos se realizaron con un nivel de tensión media P y una

amplitud de tensión  $0.9 P$  respecto a este nivel medio, es decir, variando la tensión entre un valor mínimo  $P - 0.9 P$  y otro máximo  $P + 0.9 P$ . El valor de esta tensión  $P$  se fijó de tal manera que la vida a fatiga de las probetas se situara entre cien mil y un millón de ciclos. Para ello se comenzaron los ensayos de cada referencia utilizando un nivel medio que, basándose en la experiencia previa, se considera conducirá a una vida en torno al intervalo de vida deseado. En estas condiciones se efectuó el primer ensayo de cada referencia. En el caso de que la rotura se produjera en un plazo inferior a los cien mil ciclos se reduciría el nivel de esta tensión media. Por el contrario, si la vida de las probetas rebasara el límite superior de un millón de ciclos se incrementaría el nivel de la tensión.

La realización de estos ensayos de fatiga sobre probetas de las distintas referencias permitieron comprobar que esta vida a fatiga se consigue en todos los materiales, procesos de corte y estado de acabado con una tensión media de 84.2 MPa. Esto supone que la tensión oscilará entre un valor mínimo de 8.4 MPa y un máximo de 160 MPa, con una relación de tensiones  $R = 0.052$ . Las probetas correspondientes a la aleación 7475, cortada por láser y en estado bruto de corte, poseen una vida ligeramente inferior al mínimo establecido pero, dado que la diferencia es pequeña, se ha optado por mantener el mismo nivel de tensión, facilitando las comparaciones.

Se ensayaron seis probetas de cada una de las distintas referencias, efectuándose todos los ensayos en idénticas condiciones, con el fin de valorar la dispersión de resultados.

#### 2.4. Estudio metalográfico y fractográfico

Finalizado el ensayo de las probetas una mitad de cada una de ellas se destinó al examen de su superficie de fractura en el microscopio electrónico de barrido en tanto que se extrajeron probetas metalográficas longitudinales de las otras mitades, incluyendo los puntos en que la observación visual apunta a que constituyen los orígenes de las roturas. La identificación de las partículas y fases presentes en los materiales en las distintas condiciones, y que han contribuido al proceso de fallo, se efectuó por medio de espectrometría por dispersión de energía de rayos X.

### 3. RESULTADOS

Las gráficas de las figuras 1 a 4 presentan los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga de las probetas correspondientes a la aleación 7475 cortada por punzonado, de esta misma aleación cortada por láser, de la aleación 2024 cortada por punzonado y de esta última cortada por medio de láser, respectivamente. En todos los casos se presentan los datos correspondientes tanto a las chapas en estado

bruto de corte como con los cantos matados para poder calibrar la mejora sobre la vida a fatiga que se obtiene por la realización de esta operación adicional.

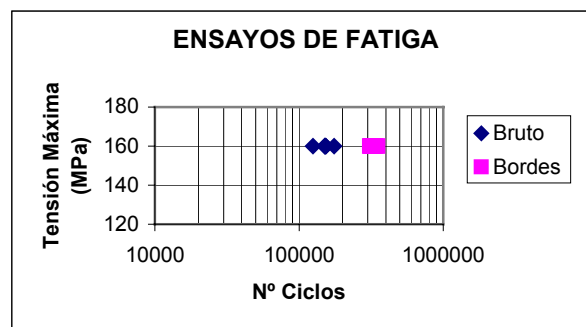


Fig 1. Gráfica de la tensión máxima aplicada frente al número de ciclos a rotura de la aleación 7475 cortada por punzonado.

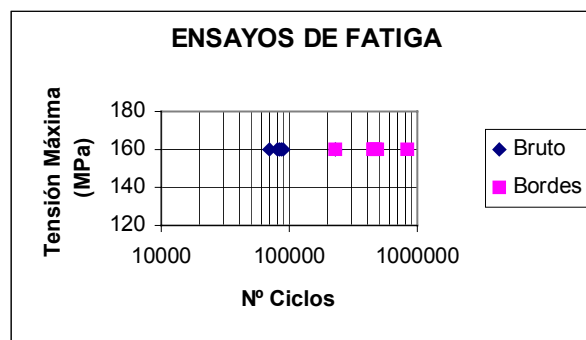
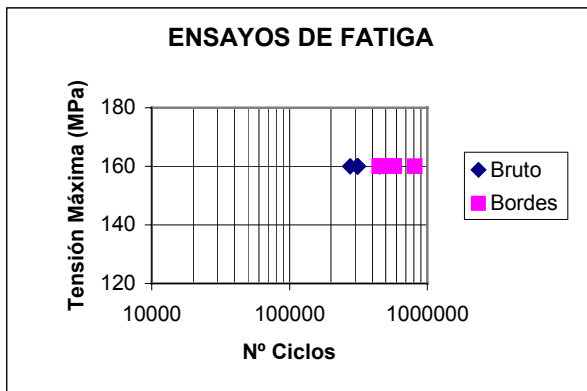


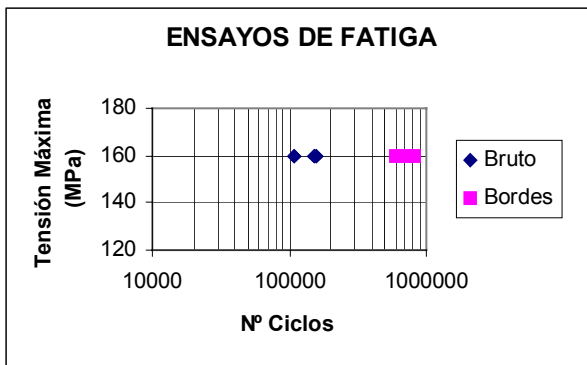
Fig 2. Gráfica de la tensión máxima aplicada frente al número de ciclos a rotura de la aleación 7475 cortada por láser.

Se puede comprobar fácilmente que en todos los casos estudiados las probetas con los cantos matados ofrecen una vida a fatiga sensiblemente superior a las del mismo material y proceso de corte pero que se halla en estado bruto de corte, sin haber realizado ninguna operación posterior.

Era lógico esperar este comportamiento puesto que la mejora de la calidad superficial que se obtiene por el matado de los cantos repercutirá favorablemente sobre las prestaciones a fatiga del material [2]. No obstante, con la excepción de la aleación 7475, cortada por láser y que se halla en estado bruto de corte, las vidas a fatiga de todas las probetas se sitúan por encima del límite inferior establecido de cien mil ciclos. Es preciso recalcar, por tanto, que si bien el matado de los bordes supone una mejora indiscutible sobre la vida a fatiga, el nivel que se alcanza eliminando esta operación puede resultar suficientemente satisfactorio, con el ahorro que ello conlleva.



**Fig 3.** Gráfica de la tensión máxima aplicada frente al número de ciclos a rotura de la aleación 2024 cortada por punzonado.



**Fig 4.** Gráfica de la tensión máxima aplicada frente al número de ciclos a rotura de la aleación 2024 cortada por láser.

Ya se ha señalado que la única excepción la constituye el caso de la aleación 7475, cortada por láser y que se encuentra en estado bruto de corte. El examen de las probetas metalográficas extraídas de las muestras correspondientes a los estados bruto de corte y con matado de bordes permite obtener una explicación a este diferente comportamiento. En efecto, la figura 5 revela la morfología rugosa de las muestras que se hallan en estado bruto de corte, pudiéndose observar, además la existencia de una capa periférica cuya microestructura se ha visto alterada por el calor aportado por el haz del láser.

Aún más, cuando se compara la rugosidad de estas muestras con las que presentan las de esta misma aleación pero que han sido cortadas por punzonado se aprecia una notable diferencia, siendo la de las cortadas por láser sensiblemente mayor. Se ha recalcado previamente la notable influencia ejercida por la

presencia de marcas o entallas ya que fácilmente pueden convertirse en grietas [2]



**Fig. 5.** Estado superficial de la probeta cortada por láser de la aleación 7475 en estado bruto de corte.



**Fig 6.** Estado superficial de la probeta cortada por punzonado de la aleación 7475, en estado bruto de corte.

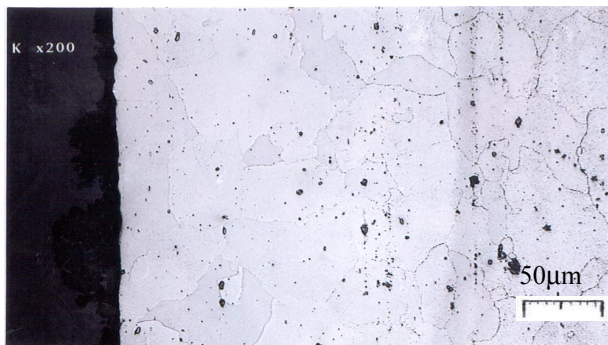
La observación de las micrografías de las figuras 5 y 6, esta última obtenida en una de las muestras cortadas por punzonado, en estado bruto de corte, permite comprobar la validez de este comentario.

Esta diferencia en la calidad superficial de unas y otras probetas justificaría la menor vida a fatiga de las probetas cortadas por láser, en estado bruto de corte, frente a las cortadas por punzonado, en la misma condición, hecho que se puede observar por la comparación de los resultados presentados en las figuras 1 y 2.

El examen de las superficies de fractura de las probetas de fatiga correspondientes extraídas de muestras que han sido cortadas por láser y cuyos bordes de corte no han sido matados posteriormente supone una confirmación de la hipótesis formulada asociando la menor vida a fatiga con la inferior calidad superficial. Este examen revela que el origen del fallo se sitúa en todos los casos en las entallas y marcas de corte existentes en la periferia de las probetas.



Cuando se ha procedido al matado de los bordes tras el proceso de corte se aprecia una notable disminución de la rugosidad de la superficie y la desaparición de la zona afectada térmicamente durante el corte. Una simple comparación de la micrografía de la figura 7 con la exhibida en la figura 5 permite comprobar estos aspectos.



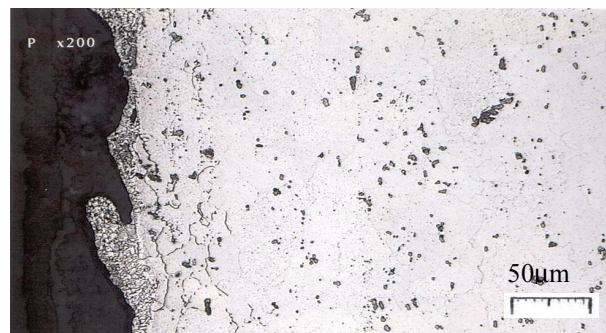
**Fig 7.** Estado superficial de la probeta cortada por láser de la aleación 7475, con matado de los bordes.

La comparación entre los materiales cortados por cada uno de los procesos y con los distintos estados de acabado merece un comentario más amplio. En estado bruto de corte las muestras de la aleación 7475 que han sido cortadas por el proceso de punzonado exhiben una mejora en el comportamiento a fatiga con respecto a las de esta misma aleación cortadas por láser. Ya se ha ofrecido previamente una explicación razonable para estas diferencias basada en la mejor calidad superficial de las primeras.

Sin embargo, cuando se han procedido al matado de los cantos los valores que se obtienen por uno u otro proceso de corte son muy similares, o incluso ligeramente favorables al corte por láser, aunque los resultados correspondientes a este proceso muestran una mayor dispersión. Este cambio en la tendencia se debe atribuir a la notable mejora que se introduce en el material cortado por láser por la operación de matado de los bordes. En este caso la mejora obtenida en la vida a fatiga con esta operación adicional de matado de bordes es suficiente para conseguir rebasar la barrera establecida en la vida a fatiga y poder considerar aceptable el proceso de corte y acabado empleados.

También la aleación 2024 presenta un mejor comportamiento frente a la fatiga en estado bruto de corte cuando este proceso se efectúa por punzonado. La observación metalográfica de la probeta extraída de la muestra cortada por láser pone de manifiesto la mayor rugosidad de la misma y la existencia de una capa afectada por el proceso de corte, aunque resultan menos acentuadas que en la aleación 7475. La figura 8 muestra esta capa periférica transformada y su

comparación con la micrografía de la figura 9, obtenida en una probeta con matado de bordes, permite apreciar la mejora que se consigue en la calidad superficial por esta operación adicional.



**Fig 8.** Estado superficial de la probeta cortada por láser de la aleación 2024, en estado bruto de corte.

En el caso de las muestras de esta aleación que han sido cortadas por el proceso de punzonado el daño causado es sensiblemente menor, lo que se traduce que la mejora en la vida a fatiga que se consigue por el matado de los bordes no sea tan acentuada.

La micrografía de la figura 10 obtenida en una muestra cortada por el proceso de punzonado y que se halla en estado bruto de corte permite establecer una comparación con la previamente comentada cortada por láser de la figura 8.

También en este caso el matado de los bordes invierte el orden ya que en las muestras que han sido sometidas a esta operación la vida a fatiga de las cortadas por láser es ligeramente superior. Además en esta aleación la dispersión de los valores obtenidos en los ensayos de probetas de fatiga extraídas de muestras cortadas por láser y con los bordes matados es sensiblemente menor que el que presentan las cortadas por punzonado y que se hallan en el mismo estado de acabado.

Por su parte, la comparación entre los resultados obtenidos en muestras de las dos aleaciones con el mismo proceso de corte y acabado se inclina a favor de la aleación 2024, especialmente en el caso de las muestras en estado bruto de corte, si bien se aprecia también una ligera ventaja de esta aleación cuando la comparación se efectúa entre las muestras con los bordes matados. Esta ha sido la razón principal que ha promovido el uso de la aleación 2024 en aquellas aplicaciones en que el comportamiento a fatiga constituía un requisito básico en tanto que las aleaciones de la serie 7XXX se emplean preferentemente en los componentes en que la principal exigencia era la resistencia mecánica elevada [4]. Además, una comparación efectuada sobre el comportamiento a fatiga de una aleación 7075 en estado T6 con otra 2024 en la condición T3 ha

mostrado que la primera presenta unas peores prestaciones en los ensayos efectuados sobre probetas con entallas profundas [7]. Esta observación concuerda con la mayor influencia negativa de la pobre calidad de las muestras cortadas por láser sobre la vida a fatiga.



**Fig 9.** Estado superficial de la probeta cortada por láser de la aleación 2024, con bordes matados.

El examen de las superficies de fractura de las distintas probetas efectuado en el microscopio electrónico de barrido no sólo revela los puntos de origen de los fallos poniendo de manifiesto la enorme incidencia de las entallas y marcas de corte en la vida a fatiga sino también el efecto negativo ejercido por las partículas de segunda fase presentes en las aleaciones. Efectivamente, aunque la mayor parte las superficies de fractura se hallan cubiertas por las estrías características de una rotura por fatiga, también se observa en algunas zonas que partículas de segunda fase, groseras, primarias, formadas en el curso de la solidificación han contribuido en el proceso de fallo, acelerando el mismo.

Estas partículas corresponden generalmente a compuestos intermetálicos y son difíciles de disolver en el tratamiento térmico, una vez que se han formado, por lo que la solución lógica se basa precisamente en evitar su formación. En las condiciones de producción de las aleaciones industriales ésta es una tarea prácticamente imposible salvo que se ejerza un control muy estricto de la presencia de aquellos elementos que promueven su aparición.



**Fig 10.** Estado superficial de la probeta cortada por punzonado de la aleación 2024, en estado bruto de corte.

En el caso de la aleación 7475, la mayoría de estas partículas posee un apreciable contenido de hierro en su composición, perteneciendo un gran número de ellas al tipo aluminio – cobre – hierro, variando la relación de estos elementos de unas a otras. Este resultado concuerda con las observaciones efectuadas previamente en las probetas de fractura y fatiga de una chapa de 50 mm de espesor de esta misma aleación [5] y pone de manifiesto el importante papel jugado por el hierro en el comportamiento a fatiga de la aleación, pese a estar limitado el máximo contenido de este elemento a niveles muy bajos.

Aunque los inicios del fallo se identifican con las entallas de corte y las marcas superficiales, y por tanto la contribución de las partículas puede considerarse secundaria en la nucleación de las grietas, su posterior propagación se acelera de forma notable por su presencia. Estas partículas no pueden acompañar a la matriz circundante en su deformación por lo que se generan pequeñas cavidades en la interfase partícula – matriz. En el curso de la progresión de la grieta, ésta se ve facilitada por la unión de la grieta principal con las pequeñas cavidades formadas en torno a las partículas, facilitando la rotura [6].

Esta descohesión entre las partículas y la matriz conduce a la aparición de cúpulas dúctiles en las superficies de fractura, intercaladas en las zonas de estrías de fatiga permaneciendo, en muchos casos, las partículas que han contribuido al fallo en el interior de dichas cúpulas, permitiendo así identificar la naturaleza de las mismas y valorar la contribución que ejercen los elementos de aleación e impurezas sobre el comportamiento a fatiga y adoptar las medidas oportunas para su optimización.

Pese al mayor contenido en hierro de la aleación 2024 (un máximo admisible de 0.5 frente a tan sólo 0.12 en la aleación 7475), la presencia de partículas ricas en este elemento en la superficie de fractura de las probetas es menor. La mayoría de las partículas que han contribuido al proceso de fractura corresponden a aluminio – cobre – magnesio, variando los porcentajes de estos elementos de unas a otras. Tanto la morfología grosera de estas partículas como el hecho de que las muestras de esta aleación no hayan sido sometidas a tratamiento térmico de maduración (habiendo sido sólo solubilizadas y deformadas en frío) induce a afirmar que el origen de estas partículas se debe buscar en la solidificación del lingote o semiproducto, a partir de los cuales se han obtenido las chapas. La aplicación posterior de un tratamiento de solubilización no consigue disolver totalmente estas partículas, quedando

parte de ellas presentes en la microestructura y participando de forma activa en el proceso de rotura al provocar la aparición de unas pequeñas cavidades en la interfase partícula - matriz, lo que acelera la progresión de las grietas de fatiga, al seguir este camino más fácil. En un trabajo previo se ha indicado que estas partículas que han sido identificadas como fase S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) no sólo contribuyen a la propagación sino que incluso constituyen puntos propicios para su nucleación [8].

#### 4. CONCLUSIONES

a.- Se ha analizado el efecto ejercido por dos procesos de corte diferentes y dos estados de acabado superficial sobre el comportamiento a fatiga de dos aleaciones de aluminio de alta resistencia (2024 y 7475)

b.- Los resultados obtenidos demuestran que la incidencia del estado de acabado superficial de los cortes sobre la vida a fatiga es muy superior que la ejercida por el uso de uno u otro proceso de corte. En todos los casos la vida a fatiga del material en estado bruto de corte es inferior a la registrada para el mismo proceso de corte pero con los bordes de corte matados.

c.- No obstante, la vida a fatiga rebasa, con una única excepción, el límite inferior establecido de cien mil ciclos. Este hecho supone que, aunque el matado de los bordes produce una mejora en el comportamiento a fatiga, se puede considerar la posibilidad de eliminar esta operación con el ahorro de tiempo y dinero que ello significa.

d.- Las muestras de la aleación 7475 que han sido cortadas por láser y se encuentran en estado bruto de corte, no alcanzan dicho nivel mínimo de cien mil ciclos en ninguno de los seis ensayos efectuados. El examen de las probetas metalográficas extraídas de estas muestras pone de manifiesto la existencia de numerosas marcas y entallas de corte en la periferia de las mismas que constituyen puntos propicios para el inicio del fallo, aspecto que se ve confirmado por la observación de las superficies de fractura en el microscopio electrónico de barrido. El examen metalográfico revela además la existencia de una capa de material que se ha visto afectada térmicamente por el proceso de corte, viéndose alterada su microestructura.

e.- Las muestras de la aleación 7475 cortadas por láser pero cuyos bordes han sido matados posteriormente ofrecen una vida a fatiga similar o incluso mejor que la registrada en las que han sido cortadas por punzonado y sus bordes se encuentran en el mismo estado de acabado. La notable mejora en la calidad superficial, con la desaparición tanto de las entallas superficiales como de la capa afectada térmicamente por el proceso de corte, que se observa en el estudio metalográfico justifica este incremento en la vida a fatiga.

f.- Las probetas de la aleación 2024 que han sido cortadas por láser y sus bordes se hallan en estado bruto de corte también presentan un peor comportamiento que las punzonadas que se encuentran en este mismo estado pero en este caso la vida a fatiga rebasa el límite inferior de cien mil ciclos.

g.- El matado de los bordes de corte conduce a una inversión en el comportamiento a fatiga de esta aleación, pasando las cortadas por láser a superar a las de punzonado, presentando además estas la ventaja de una menor dispersión de resultados.

h.- La comparación de las dos aleaciones en la misma condición (proceso de corte y estado de acabado) resulta favorable a la 2024 en todos los casos analizados.

i.- Se ha observado una notable contribución de las partículas de segunda fase en el proceso de fallo por fatiga de ambas aleaciones, acelerando el mismo, por la aparición de mecanismos de fallo estáticos. En las probetas de la aleación 7475 las partículas ricas en hierro son las que juegan un papel más importante, especialmente el aluminio – hierro – cobre. Este resultado se halla en concordancia con las observaciones de las superficies de fractura de las probetas de fatiga extraídas de una chapa gruesa de 50 mm de esta misma aleación, aconsejando restringir el máximo contenido en este elemento a unos niveles incluso más bajos que los establecidos por los actuales límites.

j.- En la aleación 2024, además de las partículas ricas en hierro, que pese al mayor contenido en este elemento de la aleación han jugado un papel secundario, se observan otras constituidas por aluminio, cobre y magnesio, que pudieran ser identificadas como fase S, aunque varía la relación entre estos elementos de unas a otras. La morfología de estas partículas apunta a que se han formado en el proceso de solidificación y no han sido disueltas en el posterior tratamiento de solubilización. El hecho de que la aleación se halle sólo solubilizada y deformada en frío, sin haber recibido tratamiento de maduración, apoya esta hipótesis.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Los autores desean agradecer a la empresa Gamesa Aeronáutica por el suministro de las muestras de material utilizadas en este estudio y al Gobierno Vasco por la ayuda prestada al mismo.

#### 6. REFERENCIAS

- [1] Simpson G.P. y Culkin T. J. "Laser cutting" Metals Handbook Ninth Edition. Vol. 14 Forming and Forging, pp 735 – 742, ASM International. Materials Park Ohio.
- [2] Leis B. "Effect of surface condition and processing on fatigue performance" ASM Handbook Vol. 19 Fatigue and Fracture, pp. 314 – 320. ASM Materials Park Ohio, 1996
- [3] Selection and application of aluminum alloys. Aluminum and Aluminum Alloys, pp 59 – 87. ASM International. Materials Park Ohio.
- [4] Rendings K. H. "Metallic structures used in aerospace during 25 years and prospect" SAMPE'94, 15<sup>eme</sup> Conference Exposition Internationale. Toulouse. Junio 1994.
- [5] Irisarri A. M. y Atxaga G. "Fractographic study of two damage tolerant aluminium alloys" 13<sup>th</sup> European Conference on Fracture ECF 13. San Sebastián. Septiembre 2000.
- [6] Quinton Bowles C. "Fracture and structure" ASM Handbook, Vol. 19, Fatigue and Fracture pp 5 – 14, ASM International Materials Park Ohio, 1996.
- [7] Bucci R.J. "Selecting aluminum alloys to resist failure by fracture mechanisms" ASM Handbook Vol. 19, Fatigue and Fracture, pp. 771 – 812. ASM Materials Park Ohio, 1996
- [8] Suresh S. Fatigue of Materials, pp 152 – 156, Cambridge University Press, 1998