

RESISTENCIA A FATIGA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T6 EN FUNCIÓN DEL TIPO DE ENSAYO Y ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO

M. Toledano¹, M. A. Arenas², J.J. Galán¹, L. Ramirez¹, S.M. Borja², A. Conde², A. Monsalve³

¹Área de Ciencia e Ingeniería de Materiales, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos.
Campus de Elviña s/n, 15071 Coruña. E-mail: mtoledano@udc.es

²Departamento de Corrosión y Protección
Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM/CESIC)
E-mail: geles@cenim.csic.es

³Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, USACH, Santiago, Chile.
E-mail: amonsalv@usach.cl

RESUMEN

En el presente trabajo se analizan los principales tipos de ensayos de fatiga existentes en la bibliografía científica para determinar las curvas S-N, y se comparan los distintos resultados que se obtienen en función de la metodología elegida. Los autores han desarrollado su trabajo con la aleación de aluminio 7075-T6 y se ha valorado las diferencias entre los métodos de ensayo de fatiga en flexión rotativa, flexión reversible sobre probetas planas y flexión en cuatro puntos. Utilizando como metodología de ensayo la fatiga en flexión en cuatro puntos (four point bending), se ha evaluado la influencia del espesor del recubrimiento de anodizado en probetas planas sobre la resistencia y el límite de fatiga. Los resultados obtenidos con distintos espesores han puesto de manifiesto que el aumento de espesor de la capa de recubrimiento anódica no afecta negativamente a la respuesta a fatiga de la aleación. Finalmente, en el artículo se presentan y analizan las diferencias fractográficas obtenidas para los recubrimientos más representativos y como influye en ellos los distintos niveles de carga.

ABSTRACT

This paper analyses and compares the influence of the experimental methods of testing cracking parameters in the fatigue behaviour studies. For this purpose, the authors have taken into account several bibliographical data for 7075-T6 aluminium alloy obtained from rotating bending fatigue and reverse plane rotating bending tests. Four point bending tests were carried out to evaluate the importance of anodize coating thicknesses in fatigue strength. These results seem to indicate that the increase of the coating thickness improves the fatigue life. Finally, we compare the fractographic differences between several specimens of the more representative coating thicknesses and the influence of the level of external load on them.

PALABRAS CLAVE: fatiga, flexión en cuatro puntos, anodizado, aleación de aluminio

1. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio 7075 son un material de referencia en la industria aeronáutica por sus excelentes propiedades de resistencia mecánica y química frente a la corrosión. Desde hace varios años el campo de estudio de estos materiales se ha enfocado en mejorar estas propiedades utilizando recursos que no sean agresivos al ser humano y al medio ambiente [1]. Una de las alternativas con las que más se trabaja en industria es el anodizado porque supone un proceso económicamente rentable y los resultados obtenidos desde el punto de vista de la corrosión y la tenacidad son notables. Aunque existen bastantes datos en la literatura sobre el proceso del anodizado en distintas

aleaciones de aluminio (material base) y utilizando distintos tipos de electrolitos en el baño electrolítico, todavía son muy escasos los estudios enfocados a dilucidar la influencia del espesor del recubrimiento anódico en la respuesta a fatiga de los aluminios [2]. Con este trabajo de investigación, los autores pretenden aportar información en este campo estudiando las variaciones que se obtienen en las curvas S-N cuando se con 3 espesores bien diferenciados y uniformes sobre la superficie del material. Teniendo en cuenta que la variable principal de estudio es la variación de las condiciones superficiales, se descartó como metodología de ensayo la fatiga axial. Otros aspectos muy importantes que también se analizaron para elegir la metodología de ensayo fue la geometría de las

probetas disponibles y la simplicidad del mecanizado. Por ambos motivos se descartaron los ensayos de fatiga en flexión rotativa, por la dificultad para mecanizar probetas de sección circular adaptadas a ese ensayo, y el de flexión reversible sobre probetas planas. Finalmente los autores se decidieron por utilizar el ensayo de fatiga en flexión en cuatro puntos, considerando las ventajas ya mencionadas por los autores en otro artículo publicado en esta revista [3]. Por otra parte, cuando se analiza el comportamiento de un nuevo tipo de material o recubrimiento con una metodología de ensayo diferente a las convencionales es importante considerar si los cambios en la metodología pueden influir en las magnitudes numéricas de las propiedades que se analizan. En el caso de los ensayos de fatiga son varios los tipos de ensayos que pueden utilizarse para definir las curvas de Wholer o curvas S-N, y existe una amplia bibliografía relativa al comportamiento de los materiales en distintas condiciones relativas al acabado superficial, tratamiento térmico o de fatiga a altas temperaturas. Los principales ensayos para los que es posible encontrar datos de referencia son los ensayos de fatiga en flexión rotativa (rotating bending fatigue – RBF), flexión reversible de probetas planas (reversed plane bending fatigue – RPB) y flexión axial, pero los autores no han encontrado en los manuales de referencia datos de fatiga relativos a los ensayos de fatiga en flexión en cuatro puntos (four point bending – 4PB). En este sentido, la primera parte del estudio se centra en analizar la influencia que el método de ensayo tiene sobre la respuesta del material, comparando distintos tipos de ensayos, para continuar el trabajo con los datos aportados por los autores y que servirán como referencia para trabajos futuros.

2. MATERIALES

La aleación de estudio es una aleación AA7075 en estado T6. En las Tablas 1 y 2 se describe la composición nominal, y las propiedades mecánicas, respectivamente. El material disponible para los ensayos procede de chapas laminadas de 2 mm de espesor, con orientación T-L. Las probetas fueron mecanizadas con un ancho de 1,95 mm.

Tabla 1. Composición de la aleación de aluminio

	Al	Zn	Cu	Mg	Mn
7075-T6	bal	5.1-6.1	1.2-2.0	2.1-2.9	0.30

Tabla 2. Propiedades mecánicas en tracción

Aleación	σ_{uts} (MPa)	σ_{ys} (MPa)	Alargamiento 50mm (%)	E (GPa)	K_{IC} (MPa $m^{1/2}$)
7075-T6	570	505	11	71	25

En la Tabla 3 se indican las nomenclaturas utilizadas para cada tipo de material.

Tabla 3. Nomenclatura de los tratamientos utilizados.

Nomenclatura	Recubrimiento
A7R	Ninguno - Material de referencia
A7SA2	Anodizado sulfúrico con espesor de 2 μ m
A7SA5	Anodizado sulfúrico con espesor de 5 μ m
A7SA10	Anodizado sulfúrico con espesor de 10 μ m

Las capas anódicas se crecieron sobre probetas planas de sección rectangular en una disolución de H_2SO_4 0,4 M a una temperatura de 35°C, aplicando un voltaje constante de 20V durante 5 minutos para las capas de 2 μ m de espesor. Las capas más gruesas, de 5 μ m y 10 μ m se obtuvieron aplicando un potencial en rampa de 4V/min, hasta alcanzar un valor de 20V, y después se mantuvo constante durante distintos periodos de tiempo hasta alcanzar el espesor deseado. La medida de los espesores se hizo con un equipo Fischerscope.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para conocer como influye la metodología de ensayo en los resultados de la medida se consultaron los datos disponibles de la Royal Aeronautical Society [4] para los ensayos RBF (rotating bending fatigue) y RPB (reversed plane rotating bending) de la aleación de aluminio 7075-T6.

El esquema seguido por los autores para los ensayos de fatiga en flexión en cuatro puntos (4PB), consistió en dos puntos de apoyo separados una distancia L, de 45 mm, con una separación entre los puntos de carga $(2/3)L$. La Figura 1 que representa la distribución de tensiones de una viga sometida a flexión pura, es equivalente al estado en que se encuentran las probetas en el ensayo de flexión en cuatro puntos. Según se observa en el esquema, el estado tensional más desfavorable se localiza en la superficie de la probeta, porque es donde las tensiones alcanzan la máxima intensidad, siendo de tracción en la cara inferior y de compresión en la superior.

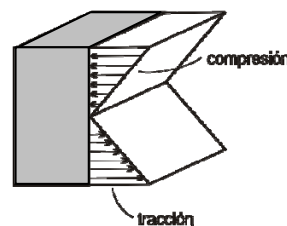


Figura 1. Distribución de tensiones en el material

Utilizando la formulacion propia de resistencia de materiales se puede deducir que la tensión nominal de tracción máxima, que se alcanza en la superficie inferior está dada por la expresión:

$$\sigma = \frac{3a}{wh^2} F \quad (1)$$

donde F es la fuerza aplicada, a la distancia entre los puntos de carga y apoyo, w es el ancho y h el espesor.

Una vez definido y fijada la configuración del ensayo el único parámetro que es necesario medir en la probeta es el ancho. El ancho nominal que se definió para el ensayo fue de 19,5 mm. Es importante destacar en este punto que, el poder utilizar esta fórmula para la expresión de la tensión representa una ventaja con respecto al ensayo de fatiga en flexión rotativa, porque el único parámetro que es necesario medir sobre la probeta es el ancho, y la tensión es inversamente proporcional a este valor. En cambio en el ensayo de fatiga RBF la tensión es inversamente proporcional al cubo del diámetro que se mide. Por tanto, la incertidumbre del resultado debido a la medida de la dimensión de la probeta se reduce sensiblemente en el ensayo de fatiga 4PB.

Los ensayos de fatiga 4PB se realizaron a temperatura ambiente en una máquina de ensayos universales servo-hidráulica Instron con un controlador de la serie 8500 y con una célula de carga de 5kN de clase 0,5, calibrada por un laboratorio acreditado. El control del ensayo se realizó en carga aplicando una onda senoidal de amplitud constante y con razón de carga R=0,1. Debido a las limitaciones mecánicas de la máquina de ensayo, los ensayos de fatiga no superaron los 15 Hz de frecuencia y se consideró el límite de ciclos tecnológico en 2×10^6 ciclos.

5. RESULTADOS

5.1. Curvas S-N

En la Figura 2 se representan los datos de la amplitud de tensión frente al número de ciclos (curvas S-N), obtenidos de la bibliografía consultada [3] para una aleación de aluminio 7075-T6. En esta gráfica se presentan los datos del comportamiento a fatiga para el material de referencia, utilizando el ensayo de flexión rotativa (RBF). También se incluyen los datos de fatiga obtenidos para esta aleación con un tratamiento superficial de anodizado sulfúrico. Se observa que en función del tipo de ensayo utilizado (RBF ó RPB) los datos serán diferentes, tanto la resistencia como la vida a fatiga, y la valoración global del proceso de anodizado no será la adecuada si se compararan datos obtenidos con metodologías diferentes.

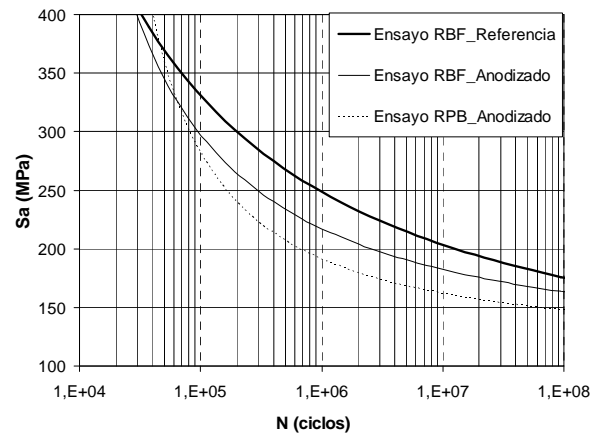


Figura 2. Datos bibliográficos del comportamiento a fatiga de la aleación 7075 en función de la metodología de ensayo y del recubrimiento.

A partir de este resultado se puede deducir que para acometer el estudio de la influencia del espesor del recubrimiento en la respuesta a fatiga de la aleación de aluminio 7075-T6, se hace necesario disponer de una base bibliográfica homogénea, en relación al tipo de ensayo, para poder comparar los resultados y valorar los efectos del tratamiento superficial.

Para analizar la influencia del recubrimiento en la respuesta a fatiga de la aleación de aluminio se utilizó como tratamiento superficial el anodizado sulfúrico, y se trabajó con tres espesores de recubrimientos, de 2, 5 y 10 μm . Los niveles de tensión aplicados para los ensayos de fatiga se establecieron en función de un porcentaje del valor del límite proporcional obtenido en el ensayo estático de flexión. Utilizando como valor promedio del límite proporcional, σ_p , 548 MPa, los niveles de carga con los que se trabajó fueron del 35%, 40%, 45%, 50%, 60% y 70%. Se comprobó que en todos los casos por debajo del $0,30 \sigma_p$ el número de ciclos hasta rotura superaba los 5×10^6 ciclos, y para niveles de carga de $0,70 \sigma_p$, las roturas se producían para $(1-2) \times 10^3$ ciclos.

Los datos experimentales fueron tratados estadísticamente utilizando la metodología de W. Maening [5] y aplicada según queda definido en otras publicaciones de los autores [6] para obtener las gráficas S-N-P (curvas S-N de probabilidad). Finalmente los datos de probabilidad del 1%, 50% y 99% fueron ajustadas con la ecuación hiperbólica (2).

$$(\log N+B)(\log S+D)=A \quad (4)$$

donde A, B y D son las constantes del ajuste.

En la Figura 3 se han incluido las curvas obtenidas después de aplicar a los datos la metodología estadística y el ajuste antes explicados. Los datos se representan en un gráfico S-N, que representan la máxima tensión cíclica de tracción frente a la vida a

fatiga. Destacar también que las gráficas que se presentan son las que corresponden a una probabilidad de fractura del 50%.

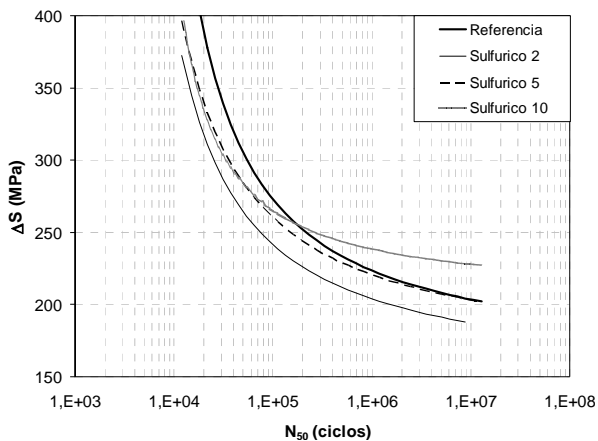


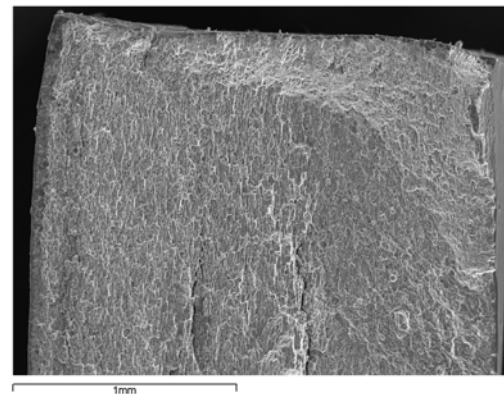
Figura 3. Curvas experimentales $S-N_{50}$ (50% de probabilidad de fractura) obtenidas en el ensayo de fatiga 4PB para la aleación de aluminio AA7075 sin tratamiento superficial, y con tres espesores de anodizado sulfúrico.

El análisis de los datos incluidos en la Figura 3 son bastante relevantes. Por un lado se observa que la respuesta a fatiga de la aleación con un anodizado convencional de 2 μm , realmente disminuye la respuesta a fatiga del material, dato que está suficiente corroborado en la literatura científica. Sin embargo, cuando se aumenta el espesor de anodizado, sobre las probetas planas con las que se trabaja, la respuesta a fatiga mejora con respecto a lo obtenido para el recubrimiento de 2 μm , y la misma tendencia se observa cuando el espesor del recubrimiento alcanza las 10 μm . En los niveles de carga más altos, que se corresponden con tensiones del $0,70 \sigma_p$, el número de ciclos para los que se produce la rotura en los tres casos del material anodizado son muy similares y las diferencias no son muy significativas, teniendo en cuenta la dispersión propia de los ensayos de fatiga. Sin embargo, a medida que disminuye la carga la diferencia en la respuesta a fatiga se hace más clara. En particular, cabe destacar la tendencia observada a aumentar el límite de fatiga según aumenta el espesor del recubrimiento. Cuando se aumenta el espesor del recubrimiento desde 5 a 10 μm , no se observa una mejora significativa en la respuesta a fatiga del material hasta los 10^5 ciclos, pero a partir de estos valores es evidente que mejora la respuesta del material, y que incluso se supera el límite de fatiga que se obtiene para el material de referencia.

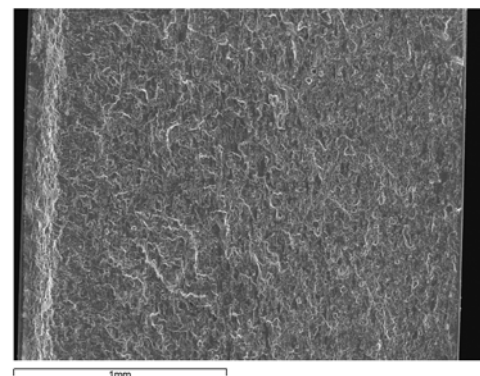
5.2. Análisis fractográfico de las superficies de rotura

En las figuras 4a, 4b y 4c presentan las imágenes de la fractura de tres secciones contiguas de una probeta A7SA10 cuya fractura se ha producido para un bajo nivel de carga (alto número de ciclos). Este es el

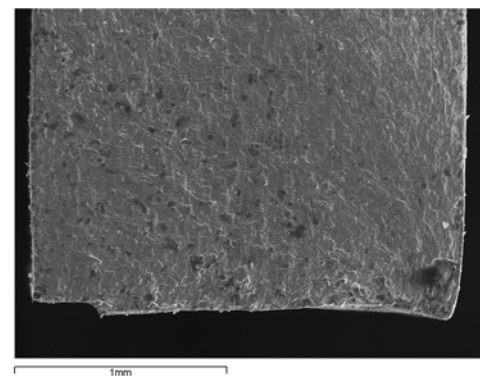
aspecto general que presentan las fracturas cuando se aplican niveles de carga bajos. El lugar donde se origina la fractura corresponde en la figura 4c a la esquina inferior derecha. A partir de este punto la grieta de fatiga se propaga hacia arriba y hacia la izquierda. A medida que avanza la grieta la superficie de fractura se va haciendo más dúctil, como se observa en las figuras 4a y 4b. En la figura 4b se observa que en el lado opuesto a la cara donde por donde avanza la grieta se produce un pequeño escalón con un ancho de 150 μm .



(a)



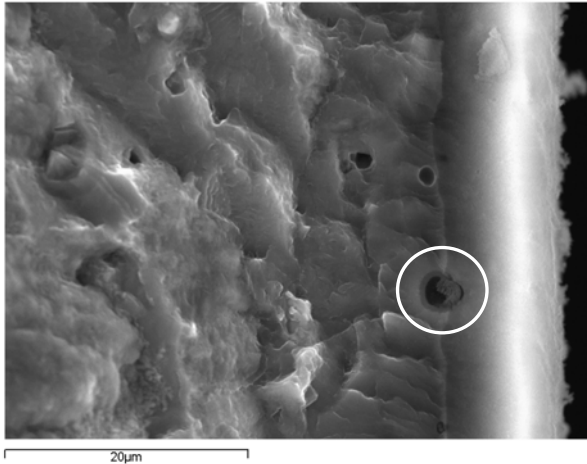
(b)



(c)

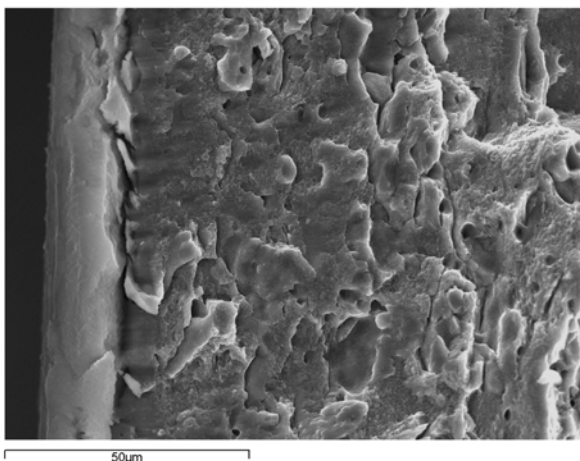
Figuras 4 a, b y c. Imágenes de la superficie de fractura de la aleación A7SA10 a 60x. La rotura se produce para $\Delta S = 45\% \sigma_p$ a 1.430.500 ciclos.

La Figura 5 corresponde a la superficie de la probeta por donde se produce el avance de la grieta de fatiga. En esta imagen se aprecia claramente la capa de óxido de alúmina con un espesor de 10 μm . La rotura de esta capa es frágil y existe una perfecta adherencia con el material de base. También destaca la presencia de partículas de segunda fase con un tamaño aproximado de 2,5 μm en la interfase metal-óxido.



Figuras 5. Superficie de la probeta que se corresponde con el lado por donde avanza la grieta de fatiga. Imagen a 2500x.

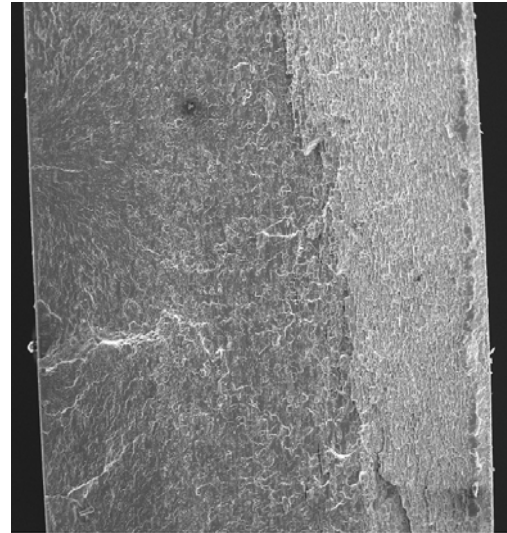
En la superficie opuesta al avance de la grieta de fatiga, en donde la fractura es más brusca porque se produce la rotura final de la probeta, la imagen de la capa de óxido ofrece un aspecto deslaminado según se observa en la Figura 6. Además, aparece una grieta entre la capa de óxido y el metal, que supone la pérdida de adherencia del recubrimiento con la aleación de aluminio.



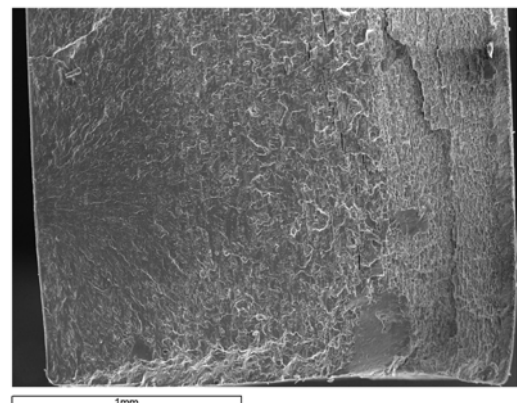
Figuras 6. Superficie de la probeta que se corresponde con la cara superior (opuesta al lado de avance de la grieta de fatiga). Imagen tomada a 1000x.

Las fractografías de las Figuras 7 a y b corresponde a la fractura de la aleación de aluminio A7SA10 con bajo número de ciclos. A diferencia del caso anterior la

fractura se inicia en varios puntos. El origen de estas fracturas múltiples podría encontrarse en los poros de la interfase metal-óxido que actuarían como desencadenantes de la descohesión entre el metal y el óxido, dando lugar a grietas que favorecerían la rápida propagación de la fractura frágil.



(a)



(b)

Figuras 7 a, y b. Imágenes de la superficie de fractura de la aleación A7SA10. La rotura se produce para $\Delta S=70\% \sigma_p$ a 13.500 ciclos.

CONCLUSIONES

- La metodología de ensayo de fatiga influye sobre el resultado numérico de la resistencia y límite de fatiga.
- El aumento del espesor del recubrimiento de anodizado no supone un deterioro en las propiedades de fatiga.
- El aumento del espesor del recubrimiento de anodizado mejora sensiblemente el límite de fatiga del material.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Xunta de Galicia el apoyo y la confianza otorgadas para la ejecución de este proyecto de investigación, mediante la adjudicación de la subvención con código PGIDIT 09TMT011CT.

REFERENCIAS

- [1] S. Wernick, R. Pinner, P.G. Sheasby, The surface treatment and finishing of aluminium and its alloys, Vol.1 5th ed., ASM International, Metals Park, OH 1995.
- [2] E. Cirik, K. Genel. Effect of anodic oxidation on fatigue performance of 7075-T6 alloy. Surface & Coatings Technology 202 (2008) 5190–5201.
- [3] M. Toledano, M.A. Arenas, A. Monsalve, A. Conde et al. “Caracterización del rango de vida finita en fatiga de la aleación AA7075 con distintos tratamientos superficiales utilizando el ensayo de fatiga en flexión en cuatro puntos”. Anales de Mecánica de la Fractura, vol. 31, 2009.
- [4] Royal Aeronautical Society. EDU 87026. “Fatigue strength of anodised aluminium alloy”.
- [5] Maenning WW. “Planning and evaluation of fatigue tests”. ASM Handbook fatigue and fracture, 1997, pp, 303-313.
- [6] A. Monsalve, M. Páez, M. Toledano et al. “S-N-P curves in 7075 T7351 and 2024 T3 aluminium alloys subjected to surface treatments”. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 30, 2007, 748-758.