Rev. LatinAm. Metal. Mat.

Artículo Regular

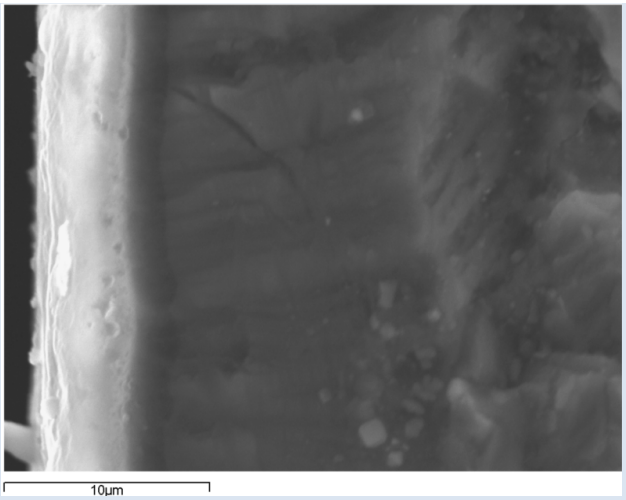
www.rlmm.org

INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LAS CAPAS ANÓDICAS EN LA VIDA A FATIGA

Mar Toledano[1], Paula Torres[1], Mari Ángeles Arenas[2], Ana Conde[2]*

1: ETSI Caminos, Canales y Puertos, Universidad de A Coruña, España
2: Departamento de corrosión y protección. CENIM-CSIC, España

**e-mail: mar.toledano@udc.es*



RESUMEN

Se estudia la influencia del espesor del recubrimiento anódico en la respuesta a fatiga usando el ensayo de fatiga en flexión en cuatro puntos sobre probetas de sección plana. El material utilizado es una aleación de aluminio de alta resistencia AA7075-T6 decapada y anodizada en ácido sulfúrico. Los espesores del recubrimiento fueron de 2, 5 y 10 µm y para cada material se obtuvieron las curvas de isoprobabilidad S-N-P del 1%, 50% y 99% de probabilidad de fractura a fatiga. Los resultados muestran que con el aumento del espesor se reduce la dispersión de los resultados, en el intervalo de vida finita. Con respecto al material de 2 µm, los recubrimientos de 5 y 10 µm mejoran la respuesta a fatiga en el intervalo de vida finita y el límite de fatiga se incrementa en un 11% en la aleación con el recubrimiento de 10 µm respecto al material de referencia.

Palabras clave: *Aleación de aluminio, Fatiga, Flexión en cuatro puntos, Anodizado.*

INFLUENCE OF THICKNESS OF LAYERS ANODE IN THE FATIGUE LIFE

ABSTRACT

This paper studies the influence of the anodic coating thickness on the fatigue properties. Fatigue tests are carried out in four points bending on samples of rectangular section. The material used is aluminum alloy high-strength AA7075-T6 subjected to a sulfuric anodizing surface treatment. The coating thicknesses were 2, 5 and 10 µm. For each type of material were evaluated fracture curves SNP of 1%, 50% and 99% probability of fatigue fracture. The results show that with increasing thickness is reduced the dispersion of results in the range of finite life. Referring to the coating material 2 µm, the coatings 5 and 10 µm on the aluminum alloy improve the fatigue behavior in the range of finite life. Furthermore, fatigue limit increases by 11% in the alloy with 10 µm coating compared to the raw material.

Keywords: *Aluminum alloy, Fatigue, Four point bending, Anodizing.*

Recibido: 11-04-2011 ; **Revisado:** 05-07-2011
Aceptado: 31-07-2011 ; **Publicado:** 08-08-2012

pISSN: 0255-6952 | eISSN: 2244-7113
Rev. LatinAm. Metal. Mat. 2012; **32** (1): 121-128

Trabajo presentado en el congreso "*XI Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (XI IBEROMET)*" celebrado en Viña del Mar (Chile) en Noviembre del 2010, y seleccionado para ser remitido a la *RLMM* para su arbitraje y publicación.

1. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de aluminio de alta resistencia utilizadas en componentes aeronáuticos trabajan en ambientes corrosivos, y en condiciones cíclicas de carga (fatiga). El recubrimiento de anodizado es un tratamiento clave como protección contra la corrosión y el desgaste [1-7], pero los estudios reportados en la bibliografía dan cuenta de un efecto perjudicial de los recubrimientos anódicos sobre el comportamiento a fatiga [8,9], debido a que la resistencia frente a cargas cíclicas está íntimamente ligada al acabado superficial de la pieza [10-12]. Además, el recubrimiento de la capa de óxido, siendo un componente esencialmente cerámico, tiene un comportamiento mecánico frágil por lo que puede fracturar con mayor facilidad que el material base (metal) bajo solicitaciones cíclicas de tensión [13]. En condiciones de fatiga, las pequeñas microgrietas generadas en el recubrimiento pueden propagarse por la interfase metál-óxido, y llegar hasta el metal base, causando notables reducciones en su resistencia [14,15].

Cuando el tipo de electrolito utilizado en el anodizado es ácido la película anódica que se forma en la superficie de la aleación es de tipo dúplex. Su tamaño y estructura dependen de las condiciones experimentales aplicadas en el anodizado de la aleación. En particular, para generar capas anódicas con distintos espesores es necesario modificar los parámetros que controlan el proceso electroquímico del anodizado. Como resultado de estos cambios, no sólo se consigue crecer la capa de alúmina sobre el aluminio, sino que además se provocan cambios en su estructura, en el acabado superficial de la aleación, y en consecuencia la resistencia a fatiga será susceptible de ser alterada con respecto a los datos tabulados para el material con un espesor convencional.

Son numerosos los trabajos en los que se pone de manifiesto que tanto el pretratamiento, como el tipo de baño electrolítico y el material base pueden modificar la estructura de la capa anódica [16-19] y alterar la respuesta del material base frente a la resistencia a fatiga [20,21]. Pero todavía son muy escasos los estudios enfocados a dilucidar la influencia del espesor del recubrimiento anódico en la respuesta a fatiga de los aluminios de alta resistencia. Los trabajos publicados que hacen referencia a este tipo de estudio [22-24] se realizaron con el ensayo de fatiga en flexión rotativa (rotating bendig fatigue - RBF) donde se utilizan probetas de sección circular. En todos los casos los resultados indican que el aumento del espesor del anodizado provoca la reducción de la resistencia a fatiga de la aleación. Por ejemplo, Cirik y Genel [22] dan cuenta de una reducción del 40% en la resistencia a fatiga cuando se aumenta el espesor del anodizado de 6 a 23 µm.

En el presente trabajo los autores proponen como método experimental para evaluar la resistencia y límite a fatiga, el ensayo de fatiga en flexión en cuatro puntos (four point bending - 4PB). A diferencia de lo que ocurre en el ensayo RBF donde las probetas son de sección circular, cuando se utiliza la metodología 4PB las probetas sobre las que se realiza el crecimiento de la capa de alúmina son de sección plana. Los espesores propuestos para el estudio son de 2 µm, que se aproxima al espesor convencional utilizado en la industria aeronáutica, 5 y 10 µm, con objeto de analizar el efecto que produce duplicar el espesor del anodizado en las curvas S-N-P de fatiga.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material objeto de estudio es una aleación de aluminio del tipo Al-Zn-Mg, AA7075 en estado T6 cuya composición detallada se incluye en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química.

	Zn	*Mg*	*Cu*	*Mn*	*Si*	*Fe*	*Cr*	*Ti*
%wt	5.6	2.5	1.6	0.3	máx 0.4	máx 0.5	0.23	máx 0.2

La elevada solubilidad del zinc y del magnesio en el aluminio hace posible que con el tratamiento térmico T6 se forme una alta densidad de precipitados, del tipo $MgZn_2$. Estos compuestos intermetálicos producen incrementos de dureza y resistencia mecánica muy superiores a las del material de partida sin tratamiento térmico. Las propiedades más destacadas, que determinan su uso en aplicaciones como componentes estructurales en la industria aeronáutica, se recogen en la Tabla 2.

Para esta investigación se optó por ensayar el material de referencia, sin ningún tratamiento superficial, y también analizar la influencia del pretratamiento de decapado previo al anodizado para dilucidar si este proceso puede alterar de manera importante la superficie del aluminio y

©2012 Universidad Simón Bolívar

contribuir a la reducción de la respuesta a fatiga. El pretratamiento consiste en un desengrasado en etanol, un ataque durante 3 minutos en una solución de 20 g/l de hidróxido sódico y una limpieza ácida en ácido nítrico (30 ml/100 ml) durante 30 segundos.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de la aleación AA7075-T651

σ_{uts} (MPa)	σ_{ys} (MPa)	Dureza HB	E (GPa)	Elongación (%)	K_{IC} ($MPam^{1/2}$)
570	505	150	71,7	11	29

σ_{uts}: Resistencia a la tracción; σ_{ys}: Límite elástico al 0,2%; E: módulo elástico; K_{IC}: Tenacidad de fractura en modo I.

Las capas anódicas se crecieron sobre probetas de sección rectangular utilizando una disolución 0,4 M de ácido sulfúrico 0,4 M a 35 ºC, aplicando un voltaje constante de 20 V durante 5 minutos para las capas de 2 µm de espesor. Las capas más gruesas, de 5 µm y 10 µm se obtuvieron aplicando un potencial en rampa de 4 V/min, desde 0 hasta 20 V, y después se mantuvo constante durante distintos periodos de tiempo hasta alcanzar el espesor deseado. La medida de los espesores se hizo con una sonda Fischerscope. En la Tabla 3 se recogen los diferentes tratamientos a los que se ha sometido la aleación AA7075-T6 objeto de estudio y la nomenclatura utilizada.

Tabla 3. Nomenclatura de los recubrimientos utilizados.

Nomenclatura	Recubrimiento
A7R	Referencia
A7PR	Sólo con pretratamiento
A7S2	Anodizado sulfúrico. Espesor de 2 µm
A7S5	Anodizado sulfúrico. Espesor de 5 µm
A7S10	Anodizado sulfúrico. Espesor de 10 µm

Las probetas se obtuvieron a partir del material laminado suministrado por el fabricante, con espesor de 2 mm. Para los ensayos 4PB se mecanizaron con sección rectangular. Las dimensiones de las probetas se definieron a partir de las características geométricas fijadas para el dispositivo de ensayo y del espesor del material suministrado. En función de estos datos se mecanizaron probetas de ancho w, 19,5 mm y de longitud nominal, D, 74 mm, según se indica en la Figura 1.

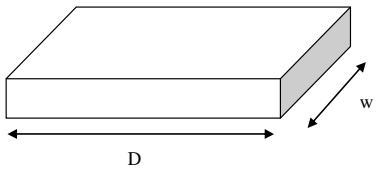


Figura 1. Geometría de las probetas.

El esquema del ensayo 4PF se presenta en la Figura 2. Los puntos de apoyo están separados una distancia L, de 45 mm, y la distancia t entre los dos puntos de carga se fijó en (2/3)L. Conforme a las dimensiones de las probetas y las magnitudes adoptadas en la definición de la geometría del dispositivo de ensayo, la relación entre el span interior, t, y el espesor, h, toma el valor de 15 y el cociente entre el span exterior L, y el ancho, w, es de 2,3.

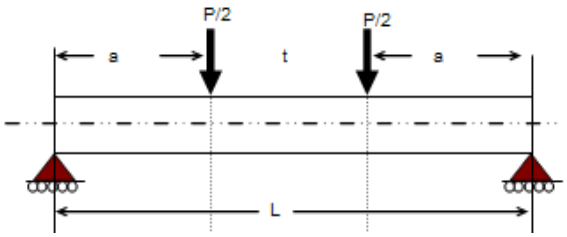


Figura 2. Esquema de ensayo en fatiga en flexión en cuatro puntos.

Con esta configuración el estado de esfuerzo más desfavorable se localiza en la superficie de la probeta, donde las tensiones alcanzan la máxima intensidad. El estudio de resistencia de materiales demuestra que en la superficie inferior, entre los dos puntos de carga, el material está sometido a un esfuerzo de tracción máximo uniforme, cuya magnitud está dada por la ecuación:

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

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

Los ensayos de fatiga 4PB se realizaron a temperatura ambiente en una máquina de ensayos universales servo-hidráulica Instron con un

controlador de torre Fast Track de la serie 8500. El programa empleado para el diseño de los ensayos es el software WaveMaker. La célula de carga de 5 kN está calibrada por patrones con trazabilidad a un laboratorio acreditado por la entidad UKAS del Reino Unido. Como resultado de estas calibraciones se determinó que la incertidumbre relativa del sistema de fuerza en todo el intervalo de medida es del 0,22%.

2.1 Ensayos estáticos de flexión

En primer lugar se caracterizaron mecánicamente las aleaciones de aluminio en condiciones estáticas para obtener la flexibilidad y el límite proporcional que se derivan del ensayo de flexión en cuatro puntos. El dato del límite proporcional se utilizó para establecer el intervalo de tensiones en el que el material se comporta elásticamente, y para definir los niveles de carga de los ensayos de fatiga. De esta forma, es posible asegurar que con los niveles de carga con los que se trabaja en fatiga el comportamiento del material está dentro del régimen elástico-lineal. Los ensayos estáticos de flexión se realizaron a temperatura ambiente, y en control de desplazamiento a la velocidad de 0,3 mm/min. Para la finalización del ensayo de flexión se impuso como límite un desplazamiento del actuador de 2 mm, debido a las características geométricas del dispositivo de flexión y al comportamiento plástico del material en las condiciones del ensayo. Con estos valores de desplazamiento y para la geometría de las probetas, las aleaciones de aluminio sufren una importante deformación plástica y el ensayo de flexión se transforma prácticamente en un ensayo de doblado.

2.2 Ensayos dinámicos de flexión

Los ensayos de fatiga se hicieron en control de carga aplicando una onda senoidal de amplitud constante con razón de carga R = 0,1, y frecuencia 15 Hz. Los niveles de tensión aplicados para los ensayos de fatiga se establecieron en función de un porcentaje del valor del límite proporcional, σ_p, obtenido en el ensayo estático de flexión en cuatro puntos. Debido a la gran dispersión que se obtiene en los ensayos de fatiga para niveles de carga próximos al límite de fatiga, se decidió ensayar cuatro probetas en cada nivel de carga. Por el contrario, para niveles altos de carga, igual o superiores al 50% del límite proporcional en flexión, la dispersión es notablemente inferior por lo que se realizaron tres ensayos en cada nivel. Además, para trazar las curvas S-N-P se decidió elegir niveles de carga espaciados un 5%, cuando se trabaja con cargas bajas, para discernir con claridad el valor del límite de fatiga y para valores más elevados de carga, se comprobó que es suficiente con definir intervalos del 10%. Asimismo, para no ensayar en la zona de bajo número de ciclos, se descartaron lo valores superiores al 70% del límite proporcional, donde debido a la elevada intensidad de las cargas que actúan, entran en juego factores plásticos que distorsionan el comportamiento elástico del material que representa la curva S-N. El intervalo de vida a fatiga cubierto en los ensayos osciló entre los 10^4 ciclos y los $2x10^6$ ciclos.

Los datos experimentales fueron tratados estadísticamente utilizando la metodología de Maennig [25,26] y aplicada según queda definido en otras publicaciones de Monsalve *et al.* [21] para obtener las gráficas S-N-P (curvas S-N de probabilidad). De esta forma, para cada nivel de tensión, se define el número de ciclos hasta fractura para probabilidades del 1%, 50% y 99%. Finalmente los distintos puntos de probabilidad fueron ajustados con la ecuación hiperbólica (2).

$$(\log N\text{-}B)\,(\log S\text{-}D) = A \qquad (2)$$

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

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ensayos estáticos de flexión se realizaron para los 5 tipos de muestras: A7R, A7PCR, A7SA2, A7SA5, A7SA10. En la Figura 3 se muestra la gráfica obtenida para una probeta A7PR donde además de los datos experimentales se ha representado la recta y la ecuación de ajuste del tramo elástico-lineal.

La pendiente de esta recta es la rigidez inicial del material en flexión, y su inversa la flexibilidad. Se comprobó que ni el pretratamento ni el anodizado afectan al comportamiento estático en flexión. El valor promedio de la fuerza proporcional se estableció en 1,9 kN y la flexibilidad inicial, C_o, en 0,68 mm/kN. En particular, para las dimensiones de las probetas utilizadas en este trabajo, el valor de la tensión límite proporcional, σ_p, es de 548 MPa. Este valor define los niveles de carga en los ensayos dinámicos de flexión, y el valor de la flexibilidad se utiliza como referencia para determinar el avance de

©2012 Universidad Simón Bolívar

la grieta de fatiga, de tal forma que el fallo del material se produce cuando la flexibilidad cíclica, C, satisfaga la ecuación:

$$C \geq C_{crítica} \quad (3)$$

definida la flexibilidad crítica como:

$$C_{crítica} = 1{,}10.C_o \quad (4)$$

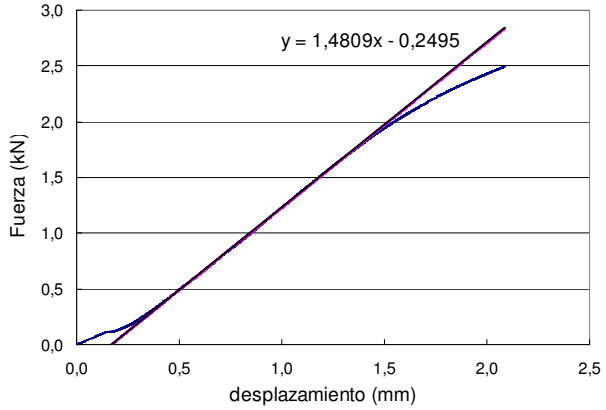


Figura 3. Gráfico tensión-desplazamiento en flexión estática en cuatro puntos.

Los ensayos dinámicos de flexión se realizaron en un intervalo de tensión ΔS comprendido entre 170 MPa y 384 MPa. En particular, los niveles de carga se eligieron tomando como referencia el 35%, 40%, 45%, 50%, 60% y 70% del límite proporcional. Se comprobó que en todos los casos por debajo del $0{,}30\sigma_p$ el número de ciclos hasta rotura superaba los $5x10^6$ ciclos, y para niveles de carga de $0{,}70\sigma_p$, las roturas se producían para $(1\text{-}2)x10^3$ ciclos.

En las Figuras 4 y 5 se presentan los puntos de probabilidad del 1%, 50% y 99% asociados a los ensayos de fatiga de las aleaciones A7R, A7PR, material de referencia y pretratado, respectivamente El eje de las ordenadas representa el intervalo de tensión cíclica y el eje de las abscisas el número de ciclos para una probabilidad de fractura del 50%.

A partir de los datos obtenidos por el ajuste estadístico de Maennig se trazaron las curvas S-N para una probabilidad de fractura del 50%. En la - Figura 6 se presentan los ajustes comparativos de la resistencia y vida a fatiga de las aleaciones A7R y A7PR.

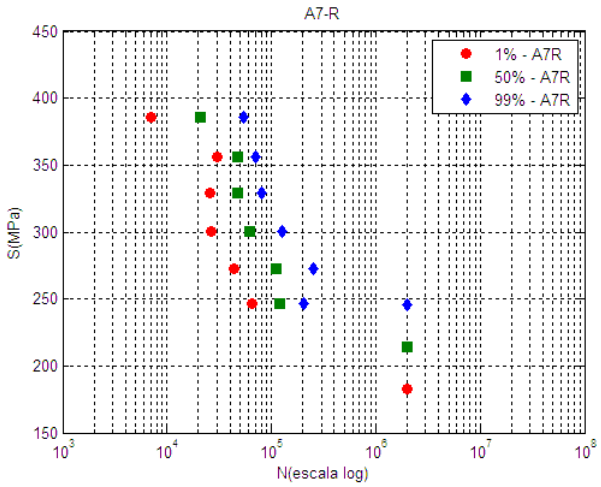


Figura 4. Aleación A7R. Puntos de probabilidad de fractura a fatiga

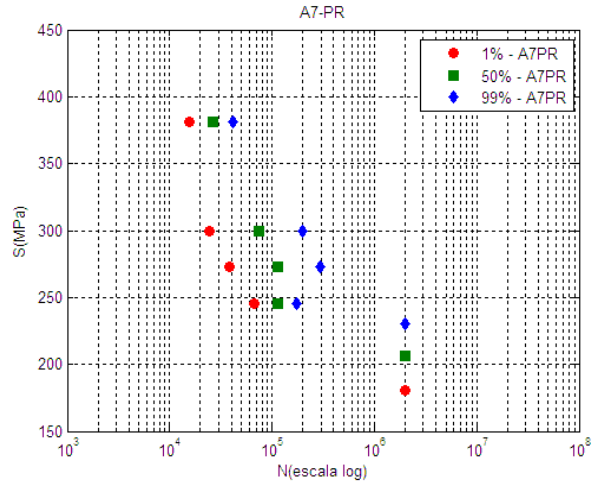


Figura 5. Aleación A7PR. Puntos de probabilidad de fractura a fatiga.

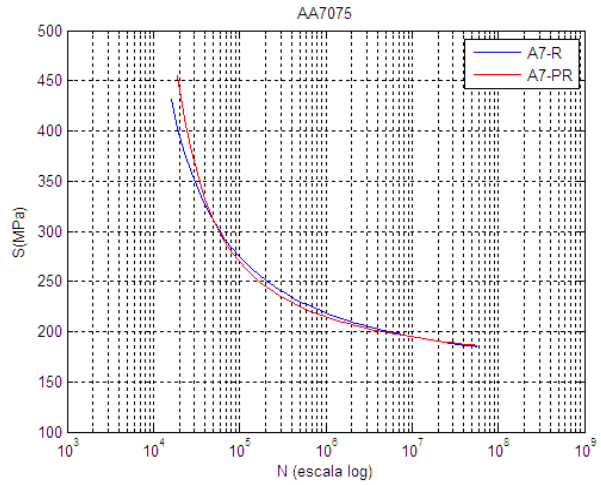


Figura 6. Curvas S-N para A7R y A7PR. Probabilidad de fractura del 50%

En esta gráfica se observa que el pretratamiento realizado sobre la aleación no influye en la respuesta a fatiga. Practicamente los datos se solapan en todo el intervalo analizado. Para los niveles de carga más altos, la curva del material pretratado parece presentar mejor respuesta que el material de referencia, pero este efecto se debe a la mayor dispersión obtenida con la aleación de referencia, como se aprecia en la Figura 4. Esta dispersión tiene su origen en los defectos superificiales que puede presentar el material sin pretratamiento ni recubrimiento superficial y que actuarían como microgrietas que facilitarían la propagacion de las grietas de fatiga.

En la Figura 7 se presentan las curvas S-N para una probabilidad de fractura del 50%. Corresponden al material de referencia, y a los materiales anodizados con los tres espesores de recubrimiento. Con objeto de dilucidar el comportamiento para un bajo número de ciclos, se ha analizado el comportamiento a fatiga de los materiales utilizando solamente el tramo comprendido entre $2x10^4$ ciclos y 10^5 ciclos, que se ajusta por una ecuación lineal. Los resultados se muestran en la Figura 8. En ambas gráficas se observa que la respuesta a fatiga de la aleación con un anodizado convencional de 2 µm, disminuye la respuesta a fatiga del material (tanto en resistencia como en el valor del límite elástico), dato que está suficientemente corroborado en la literatura científica [10]. Sin embargo, en los datos presentados en la Figura 8 lo que se obtiene es que cuando aumenta el espesor de anodizado, de 2 a 5 µm, la resistencia a fatiga mejora sensiblemente con respecto a los valores obtenidos para el recubrimiento de 2 µm, aproximándose a la resistencia a fatiga del material sin recubrimiento superficial. En cambio cuando el recubrimiento alcanza un espesor de 10 µm se obtiene una nueva pérdida de capacidad resistente a la fatiga. Es decir, cuando se utilizan probetas anodizadas de sección plana se observa que es posible hablar de un espesor de recubrimiento óptimo con respecto a las propiedades de fatiga.

Otro aspecto importante que se presenta en la Figura 7 es el aumento del límite de fatiga según aumenta el espesor del recubrimiento, y que incluso se supera el límite de fatiga que se obtiene para el material de referencia. Las muestras anodizadas con un espesor de 2 µm presentan una reducción del límite de fatiga del 15% respecto de la aleación 7075 de referencia. No obstante, para espesores de capa anódica de 5 µm, A7S5, el límite de fatiga se incrementa, alcanzando valores análogos a las de la aleación sin tratar, A7R. Finalmente, para espesores mayores de la capa anódica, del orden de 10 µm, A7S10, el límite de fatiga aumenta un 11% aproximadamente, lo que supone una mejora muy importante en la respuesta a fatiga de las aleaciones anodizadas, porque se amplía el intervalo de tensiones en el que es posible utilizar el material con la seguridad de que no se producirán fracturas por fatiga.

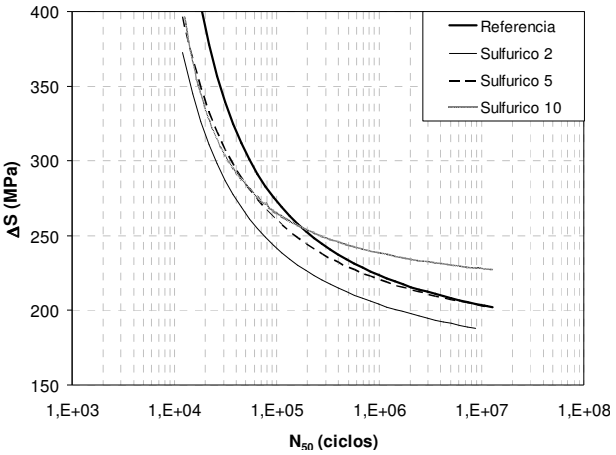


Figura 7. Curvas S-N para A7-S2, A7-S5 y A7-S10. Probabilidad de fractura del 50%.

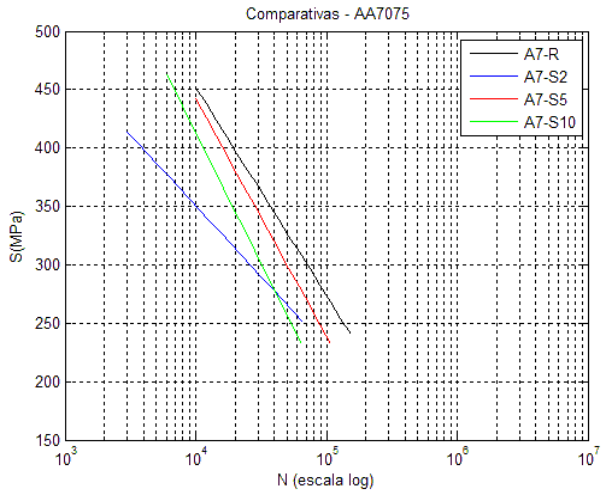


Figura 8. Resistencia a fatiga (50% de probabilidad de fractura) para la aleación de aluminio sin tratamiento superficial y con tres espesores de recubrimiento.

A diferencia de otros trabajos realizados por distintos autores, en relación a la influencia del

©2012 Universidad Simón Bolívar

espesor de los recubrimientos sobre probetas de sección circular en la resistencia a fatiga, los ensayos de fatiga que se han llevado a cabo en este trabajo han sido realizados en probetas anodizadas con sección plana. Posiblemente este factor esté contribuyendo a la tendencia diferente observada en la respuesta a fatiga. Es necesario continuar con los estudios para dilucidar con más detalle este aspecto, pero todo parece indicar que cuando se utiliza una geometría de sección circular durante el anodizado es posible que se estén provocando distorsiones en la distribución uniforme de la capa anódica, favoreciendo la proliferación de grietas en la interfase recubrimiento/sustrato, por el desarrollo de tensiones residuales internas durante el crecimiento de la capa anódica [27]. En cambio, con el ensayo de fatiga en flexión en cuatro puntos las probetas sobre las que se realiza el anodizado son de sección plana y este factor favorece la reducción de variables que puedan alterar la homogeneidad de la capa de anodizado, optimizando el proceso de recubrimiento de los materiales utilizados para el análisis de la respuesta a fatiga con diferentes espesores de recubrimiento.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que el pretratamiento realizado en la aleación A7075-T6 no influye en el comportamiento a fatiga de la aleación de aluminio.

Utilizando el ensayo de fatiga 4PB y probetas anodizadas de sección plana se observa que es posible encontrar un espesor de anodizado óptimo con el que la resistencia a fatiga para un bajo número de ciclos se aproxima a la del material sin tratamiento superficial. Además, el límite de fatiga crece con el espesor del recubrimiento, alcanzando valores por encima de los que presenta la aleación sin recubrimiento A7R.

5. 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.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]. Ren J, Zuo Y. Surface and Coatings Technology, 2005; 191: 311-316.

[2]. Li X, Nie X, Wang L, Northwood DO, Surface and Coating Technology, 2005; 200 (5-6):1994-2000.

[3]. Rateick RG, Binkowski TC, Boray BC, Journal of Material Science Letters, 1996; 15 (15): 1321-1323.

[4]. Sadeler R, Journal of Material Science Letters, 2006; 41: 5803.

[5]. Eifert AJ, Thomas JP, Rateick RG, Scripta Materialia, 1999; 40: 926-936.

[6]. Lonyuk B, Apachitei I, Duszczyk J, Surface and Coatings Technology, 2007; 201 (21):8688-8694.

[7]. Camargo J, Voorwald H, Cioffi M, Costa MYP, Surface and Coatings Technology, 2007; 201 (24): 9448-9455.

[8]. Sadeler R, "Effect of a commercial hard anodizing on the fatigue property of a 2014-T6 alluminium alloy". En: Journal of Materials Science Letters, Vol. 41, Nº18. Springer Netherlands Ed. 2006.

[9]. Camargo J, Voorwald H, "Influence of anodization on the fatigue strength of 7050-T7451 aluminium alloy". En: Fatigue and Fracture Materials Structure, 2007; 30: 993-1007.

[10]. Forrest PJ, *"Fatigue of metals"*. Addison–Wesley, USA. 1962.

[11]. Rolfe ST, Barsom, JM, " Fracture & Fatigue control in structures", Prentice Hall, NJ, 1977.

[12]. Suraratchai M, Kimido J, Mabru C, Chieragatti R, "Modelling the influence of machined surface roughness on the fatigue life of aluminium alloy". En: International Journal of Fatigue, 2008; 30: 2119-2126.

[13]. Merati A, Eastaugh G, " Determination of fatigue related discontinuity state of 7000 series of aerospace aluminum alloys". En: Engineering Failure Analysis, 2007, 14: 673-685.

[14]. Torres MAS, Voorwald HJC, International Journey of Fatigue, 2002; 24: 877-886.

[15]. Camargo JA, Cornelis HJ, et al., "Coating residual stress effects on fatigue performance of 7050-T451alluminum alloy". En: Surface and Coating Technology, 2007; 201: 9448-9455.

[16]. Thompson GE, Wood GC, "Corrosion Aqueous Processes and passive Films, Treatise on Material Science and Technology", V 23, Ed. J.C. Scully, Academic Press Inc., London, 205, 1983.

[17]. Davies NC, Sheasby PG. "Anodic aluminium

©2012 Universidad Simón Bolívar

oxide film and method of forming it". EP 0 181 173 AL. Elsevier, 1986.

[18]. García Rubio M, Ocon P, Curini P, Thompson GE, et al., Corrosion Science, 2010; **52**: 2219.

[19]. Dimogerontakis Th., Tsangaraki-Kaplanogou I, " The influence of certain sulfonic triphenilmetane dyes, as additives, on anodizing of aluminum in phosphoric acid", Thin Solid Films, 2001; 385 (1-2): 182-189.

[20]. Valencia N, "Estudio del Efecto del Anodizado en Aleaciones de Aluminio 7075 T735", Tesis de Ingeniero Aeronáutic. Academia Politécnica Aeronáutica, 2003.

[21]. Monsalve A, Páez M. et al. "S-N-P Curves in 7075 T351 and 2024 T3 aluminium alloys subjected to surface treatments". Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2007; 30: 748-758.

[22]. Cirik E, Genel K, "Effect of anodic oxidation on fatigue performance of 7075-T6 alloy", Surface and Coatings Technology, 2008; 202: 5190-5201.

[23]. Goetz JM, "Investigation of Coating Cracking and Fatigue Strength of 7050-T74 Aluminium alloy with Different anodizing coating Thickness". Honors Thesis. The Ohio State University. Ohio, USA. 2005.

[24]. Rateick RG, Binkowski TC, Boray BC, "Effect of hard anodize thickness on the fatigue of AA6061 and C355 aluminium", Journal of Materials Science Letters Vol.15. Pp. 1321-1323. Springer Netherlands Ed. August 1996.

[25]. Jürgen J, Wolfgang-Werner M, "Safe evaluation of fatigue data in the range of finite endurance". International Journal of Fatigue, Vol. 19, No 4, pp. 335-344. 1997.

[26]. Wolfgang-Werner M, "Planning and evaluation of fatigue tests". ASM 19, Fatigue And Fracture (ASM International). Pp. 303-313. 1996.

[27]. Camargo JA, Cornelis HJ et al. "Coating residual stress effects on fatigue performance of 7050-T7451 aluminum alloy", Surface and coatings technology, 2007; 201: 9448-9455.

©2012 Universidad Simón Bolívar