

DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS S-N-P EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 7075-T7351 SOMETIDA A TRATAMIENTO SUPERFICIAL DE ANODIZADO

A. Monsalve*, M. Páez**, M. Toledano[†], R. Parra*, Y. Sepúlveda**, N. Valencia***

(*) Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Casilla 10233, Santiago, Chile

amonsalv@lauca.usach.cl

(**) Departamento de Química de los Materiales, Facultad de Química y Biología, USACH, Casilla 40, Correo 33, Santiago, Chile.

(***) Academia Politécnica Aeronáutica, Departamento de Investigación, P36 ½ Gran Avenida, Santiago.

([†]) Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de la Coruña, Campus Elviña, A Coruña.

toledano@iccp.udc.es

Resumen. Se analiza la vida útil a fatiga en probetas de la aleación de aluminio aeronáutico 7075 T7351, sometidas a distintos tratamientos superficiales, utilizando para ello la modalidad de fatiga rotatoria. Los tratamientos superficiales analizados son aquellos destinados a la protección contra la corrosión en este tipo de aleaciones, de acuerdo a la práctica industrial utilizada normalmente. Teniendo en cuenta que el tratamiento superficial modifica la superficie del metal, se optó por la modalidad de fatiga rotatoria por ser ésta la que genera los máximos esfuerzos en la periferia de las muestras. Los tratamientos analizados fueron: anodizado crómico, sulfúrico, y sulfúrico-bórico. Específicamente, el anodizado crómico es el que actualmente se emplea en la industria, sin embargo, su uso está cuestionado por las normativas ambientales debido a los efectos cancerígenos del ión Cr⁺⁶. Por esta razón resulta importante la valoración de métodos alternativos de protección como el anodizado sulfúrico y sulfúrico-bórico. Los resultados de la evaluación de la respuesta a fatiga rotatoria en probetas sometidas a estos tratamientos superficiales, se comparó con los resultados correspondientes a la aleación sin tratar. El análisis estadístico de las curvas S-N-P (esfuerzo, número de ciclos, probabilidad de fractura) se realizó empleando el método de Maening, lo que permitió generar cada curva a partir de un total aproximado de 50 probetas.

Abstract. The fatigue life on samples made of 7075 T7351 aeronautic aluminium alloy, submitted to different surface treatments, using rotative fatigue is analyzed. The surface treatments analyzed are those used in the protection against corrosion in these kinds of alloys, in accordance to the industrial practice normally used. Due to the surface treatment modifies the metal surface, rotative fatigue was used, because in this kind of fatigue, the maximum stresses are produced on the surface of the samples. The analyzed treatments were chromic, sulphuric and sulphuric-boric. Specifically, chromic anodizing is the method used now by the industry. However, the use of this kind of process is not compatible with the environment laws due to the carcinogenic effects of Cr⁺⁶ ion. For this reason, it is important to evaluate alternative methods to protect against corrosion, such as sulphuric and sulphuric-boric anodizing process. The results of the fatigue behaviour of samples submitted to these treatments were compared with the results of samples without surface treatments. The statistical analysis of S-N-P curves (stress, number of cycles, fracture probability), was carried out using the Maennig method, which permits to obtain each curve from a number of samples close to 50.

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo aeronáutico, es normal diseñar las estructuras con un factor de seguridad de 1.5, en tanto que en otras industrias, el factor puede llegar a ser muy superior: 10 o más. Esta estrategia de emplear bajos valores del factor de seguridad tiene por objetivo la disminución de peso. Además, muchas de las estructuras de uso aeronáutico están permanentemente sometidas esfuerzos alternantes, razón por la que el estudio de la respuesta a fatiga de las aleaciones empleadas, cobra gran validez. Esto es aún más relevante debido a la constante presencia de fenómenos de corrosión que actúan sinérgicamente con los aspectos

vinculados a la fatiga. En particular, para disminuir los efectos producidos por la corrosión, las aleaciones de uso en aeronáutica son sometidas a tratamientos de protección superficial, los cuales en algunos casos pueden ser muy severos, debido a que producen un ataque sobre la superficie que protegen. El anodizado crómico es un tratamiento usual en la industria, sin embargo, los efectos cancerígenos del ión Cr⁺⁶ hacen imprescindible, presionados por las normativas ambientales, el cambio hacia otros procedimientos de anodizado que sean menos peligrosos para la salud. La búsqueda de electrolitos alternativos de anodizado ha derivado en el estudio de la posibilidad de anodizar las aleaciones de aluminio empleando ácido sulfúrico o

bien mezclas de ácidos sulfúrico bórico. Sin embargo, dado que estos procedimientos de protección contra la corrosión producen daño sobre la superficie de las aleaciones [1], es preciso evaluar su respuesta a fatiga tras haber sido sometidas a este tipo de tratamientos.

Uno de los enfoques clásicos en el estudio de fatiga lo constituye el trazado de las curvas S-N, es decir, esfuerzo-número de ciclos. Esta metodología fue propuesta por A. Wohler, en el siglo XIX. Desde entonces, ha sido uno de los procedimientos más consagrados en el estudio de fatiga, debido a la facilidad en el trazado de las curvas S-N y a la simplicidad de su interpretación. Sin embargo, presentan el inconveniente de que usualmente en ingeniería es preciso trabajar en condiciones de servicio tales que aseguren una probabilidad de fractura por fatiga inferior al 1%. Por esta razón, es preciso incorporar a la metodología de Wohler un tratamiento estadístico que haga posible el trazado de las curvas S-N-P (esfuerzo-número de ciclos-probabilidad de fractura). Lo referente a la determinación de la curva de probabilidad de fractura, tiene su origen en la alta dispersión que poseen los ensayos de fatiga. En el presente trabajo se ha utilizado la metodología de Maennig, que ya ha sido usada por el grupo de trabajo en investigaciones anteriores [2].

2. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS DE FATIGA

Tal como se ha mencionado anteriormente, para representar convenientemente la resistencia a fatiga de un material, es preciso incluir las curvas de isoprobabilidad de fractura, tal como se muestra en la Fig. 1. Esta distribución puede ser modelizada por una distribución normal-logarítmica o bien una distribución de Weibull.

Planeación de los ensayos de fatiga

Como es sabido, existen materiales que presentan un límite de fatiga claro. Estos corresponden a metales BCC tales como los aceros de baja aleación o no aleados, molibdeno y sus aleaciones y aceros aleados ferríticos.

Para aleaciones FCC, tales como aluminio, cobre y sus aleaciones, los aceros austeníticos, martensíticos y probablemente los metales HCP tales como el titanio, no se observa un límite de fatiga claro. La no existencia de un límite de fatiga en estos materiales ha sido cuestionada por algunos investigadores [3], ya que se ha encontrado que en el límite de fatiga se sitúa entre 10^{12} y 10^{13} ciclos, ciertamente un valor demasiado grande para propósitos ingenieriles.

La curva de 99% de probabilidad de fractura separa el plano S-N, ya que a niveles de esfuerzo por encima de esta curva, las probetas se fracturarán siempre, dando origen así al rango de vida finita. A su vez la curva correspondiente a 1% de probabilidad de falla, marca el

espacio correspondiente a vida infinita, ya que por debajo de este valor, las probetas no se fracturan. Esto da origen al rango de vida infinita, existiendo un rango de transición entre los dos anteriores.

En la literatura se pueden encontrar diversos métodos para trazar las curvas S-N-P [3-4], los cuales poseen ventajas y desventajas. Debido a la buena confiabilidad obtenida para un número relativamente bajo de probetas ensayadas, los autores han utilizado el método de Maennig para obtener las curvas S-N-P.

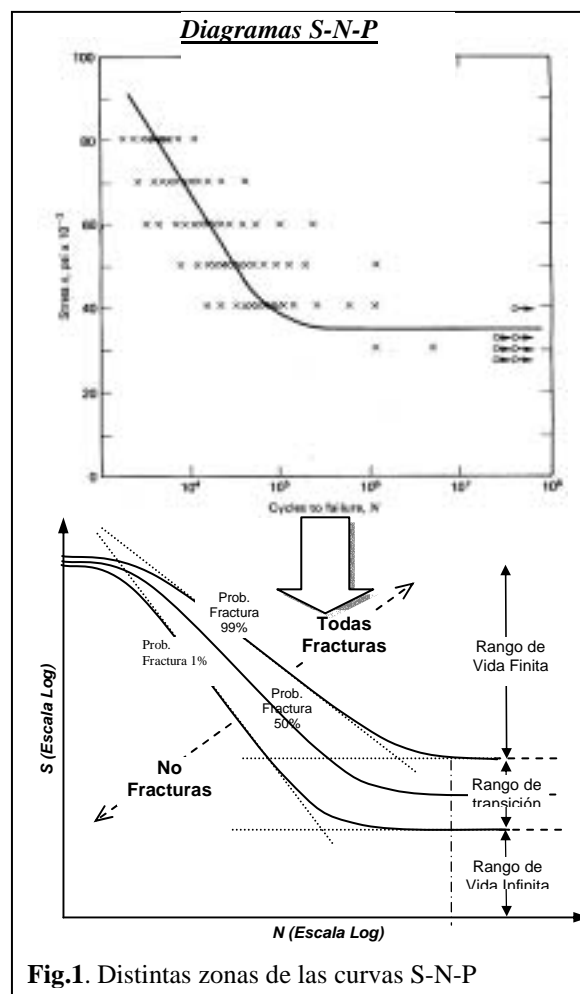


Fig.1. Distintas zonas de las curvas S-N-P

Método de Maennig

Pese a que en anteriores trabajos se ha esbozado la metodología propuesta por Maennig, se hará a continuación una revisión general acerca de este método.

En este método se evalúa en forma independiente el *Rango de Transición* y el *Rango de Vida Finita* (Fig. 1), concentrándose su aporte principalmente en el primero de ellos

El principal fundamento en la evaluación de ambos rangos es el hecho que la distribución de probabilidades sigue la distribución de Weibull, pero esta distribución

es de un manejo matemático bastante complejo. En cambio, esta distribución puede ser modelada sin grandes diferencias por medio de una distribución del tipo normal logarítmica (distribución normal del logaritmo de la variable), de manejo más sencillo.

Evaluación del Rango de Transición

La evaluación del rango de transición exige que se fije un número de ciclos y se estudie cómo varía la probabilidad de fractura con respecto a la carga aplicada. En la práctica, el experimentador sólo puede manipular la carga, y el número de ciclos se convierte en una variable dependiente.

Si la distribución de probabilidades es factible de ser representada por una recta a través de una transformación adecuada, entonces, teóricamente, esta recta puede estar a su vez representada sólo por dos puntos, o dos niveles de esfuerzo que tratan de colocarse cerca de los extremos superior e inferior del rango de transición. Estudios teóricos y prácticos han demostrado que el método es viable y que los resultados son conservadores.

El método comienza ensayando una probeta tomada al azar en cualquier nivel de amplitud de carga o esfuerzo (S_a) alternado hasta que alcance el número de ciclos $N = N_g$, que es elegido en forma arbitraria antes del ensayo, cuidando que sea lo suficientemente alto como para representar al rango de transición. Si al llegar a este límite N_g la probeta no se ha fracturado, debe ser ensayada una nueva probeta en un nivel de carga mayor y así sucesivamente hasta que el evento contrario suceda, es decir que se fracture antes de N_g . En este último nivel, se realiza el primer ensayo completo, con nueve probetas más para completar un total de 10 (en general n probetas) y se establece un criterio de “pasa - no pasa”, en el cual se contabilizan las probetas que se fracturan antes (r) y las que sobreviven a los ciclos N_g . A este nivel de carga se le debe asignar una probabilidad de fractura (P_f) (Fig. 2).

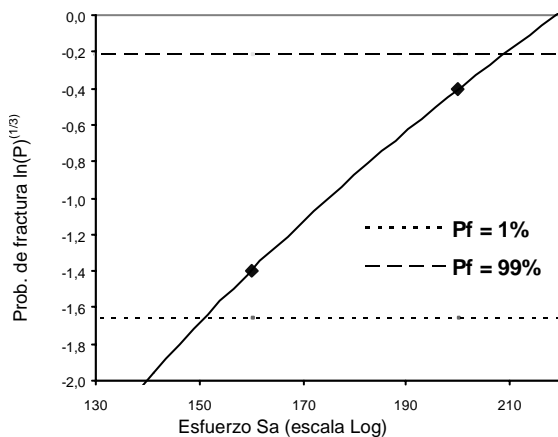


Fig. 2. Probabilidad de fractura vs. esfuerzo aplicado.

Algunos estudios teóricos y experimentales llegan a que la expresión apropiada para fatiga es [3]:

$$P_f = 100 \frac{3r-1}{3n+1} \quad \text{si } r \neq 0 \quad (1)$$

$$P_f(r=0) = 0.5 \cdot P_f(r=1) = 100 \cdot (3r+1) \quad \text{si } r=0$$

El segundo nivel de carga se encuentra a una distancia $D = \Delta S_a$, que debe ser determinada de la siguiente relación:

$$D = \left(1 - \frac{r}{n}\right) \cdot d \cdot S_a \quad \text{si } r \leq 0.5n \quad (2)$$

$$D = \left(-\frac{r}{n}\right) \cdot d \cdot S_a \quad \text{si } r > 0.5n$$

donde S_a es la carga del primer nivel ensayado completo y d el tamaño estimado del rango de transición que se obtiene de datos ya tabulados (por Ej. 0.1-0.3 para probetas de geometría suave y 0.05-0.15 si tienen entalle). En este nivel se vuelven a ensayar 10 probetas (ó las n que fueran elegidas) y se le asigna la probabilidad de acuerdo a la ecuación (1).

Al graficar la probabilidad de fractura con respecto al logaritmo de la carga se obtiene una curva en forma de S usualmente simétrica con respecto al punto de inflexión. Por medio de una transformación apropiada, esta curva en S se transforma en una línea recta, lo que resulta muy conveniente para realizar extrapolaciones. Dos transformaciones destacan: la de Probabilidad Acumulativa de Gauss, que está derivada de la Log-normal y que se trabaja a través de tablas y papeles especiales con escala de Gauss; la segunda es la transformación:

$$\Psi = \sqrt[3]{\ln(P)} ; (P \text{ en tanto por uno}) \quad (3)$$

Ambas transformaciones son apropiadas con diferencias menores. La transformación de Gauss se utilizó tradicionalmente, pero su uso es lento y tedioso. Con la introducción de la computación se ha facilitado el uso de la función Ψ que es simple de programar y graficar [3]. Un ejemplo se puede apreciar en la Fig. 2 donde fueron evaluados dos niveles de esfuerzo: 160 MPa y 200 MPa.

Así, ya en base a estos resultados se puede obtener la carga para una probabilidad del 1% y 99% en forma analítica representando la recta de la forma:

$$y = \sqrt[3]{\ln P} = \alpha \cdot \ln(S_a) + \beta \quad (4)$$

donde α y β se encuentran con técnicas de mínimos cuadrados.

De esta manera, se define S_a como:

$$S_a = e^{\left(\frac{\sqrt[3]{\ln\left(\frac{P_f}{100}\right) - \beta}}{\alpha} \right)} \quad (5)$$

donde P_f está expresado en %.

Este método entrega resultados más confiables mientras más alejados entre ellos se encuentren los puntos y más cerca de los extremos máximos y mínimos, por ejemplo un punto en 10% y el otro en 90%. Si ambos puntos se encuentran en un mismo extremo de la distribución, por ejemplo uno en 80% y otro en 90%, o, muy cercanos al 50%, por ejemplo uno 45% y otro en 55%, o en general muy cercanos entre ellos, probablemente los resultados no serán muy confiables y será necesario un tercer punto (con n probetas más) para hacer converger los resultados. Una forma de manejar lo anterior es el parámetro “ d ” en la ecuación (2). Este debe ser elegido cuidadosamente, ya que de ser muy grande, el segundo nivel podría caer fuera del rango de transición y de ser muy pequeño, podrían ambos niveles estar muy próximos o en el mismo extremo. En el presente trabajo, dado que se trabajó con probetas de perfil suave (tal como se comenta más adelante), se utilizó $d = 0.3$.

Evaluación del Rango de Vida Finita

La evaluación de este rango es similar a la del rango de transición, pero más sencillo, ya que esta vez la variable independiente es la carga y la variable dependiente el número de ciclos, que es el modo intuitivo de trabajar con fatiga.

En este rango, al aplicar la función de transformación los valores experimentales no se ajustan tan bien a una recta como en el rango de transición. Pero aún así la distribución de Gauss y la transformación ψ siguen siendo las que mejor se ajustan.

Para la estimación de la probabilidad la expresión que destaca dentro de algunas utilizadas es:

$$P_f = \frac{i - 0.417}{n + 0.166} \quad (6)$$

donde “ n ” es el número total de probetas ensayadas e “ i ” el orden correlativo que tienen al ordenarlas de mayor a menor, en términos del número de ciclos que resisten antes de romperse. En general, tres niveles con diez probetas cada uno bastarían para encontrar este rango, asignándoles una probabilidad y luego aplicando la función de transformación. Quedan completamente descartados los niveles de carga en los cuales se encuentren fracturas en el rango de fatiga de bajos ciclos. Idealmente se inicia con un nivel de carga un

poco mayor que el rango de transición y luego se aumenta la carga alternante.

Para elegir los siguientes niveles de carga se utiliza el siguiente procedimiento. Si se asume que el rango de vida finita se puede representar por una recta en un gráfico log-log, con pendiente K , y si la distancia entre un nivel y otro se elige de tal manera que la media P_{50} (50% de probabilidad de fractura) tenga un desplazamiento máximo entre un nivel y el próximo, de $N_{50,2}/N_{50,1} = \phi = (10)^{1/2} = 3.16$, para decisiones de ingeniería y de $(10)^{1/3} = 2.16$, para ensayos de alta confiabilidad, luego:

$$\frac{S_{a1}}{S_{a2}} = (\phi)^{1/K} \quad (7)$$

donde K es la pendiente de la recta y los subíndices 1 y 2 son dos niveles de carga consecutivos, siendo S_{a2} el más bajo. Para el primer valor de K , de no haber información previa, se puede partir con valores de K entre 6 y 9, preferiblemente con valores altos. Una vez que ya se han ensayado dos niveles, es posible calcular un valor más correcto de K usando:

$$K = \frac{\log\left(\frac{N_{50,1}}{N_{50,2}}\right)}{\log\left(\frac{S_{a2}}{S_{a1}}\right)} \quad (8)$$

Para cada nivel se hace una gráfica como la de la Fig. 2 y se estiman las probabilidades buscadas. De esta manera, después de evaluar tres niveles, ya se tiene suficiente información sobre el rango de vida finita, que al reunirla con la del rango de transición, permite construir el diagrama S-N-P del material en evaluación.

Ajuste de Curvas S-N

Para el ajuste, que no se encuentra directamente en el método Maennig ni en de las distintas referencias, se proponen distintos procedimientos, pero ninguno es universalmente aceptado. Los autores después de probar diversos ajustes, el de mejor resultado, al menos en aluminios, es una modificación del propuesto por A. Cantelli y M. López [4], que se puede representar a través de:

$$(\log N + B) \cdot (\log S + D) = A \quad (9)$$

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

Como se ve, el ajuste propuesto corresponde a una hipérbola cuyas asíntotas no son los ejes coordenados (S y N en este caso) sino, B y D . Es razonable pensar también que todas las curvas de probabilidad deben tener el mismo valor de B , pero distinto valor de D , ver Fig. 1.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material estudiado en el presente trabajo corresponde a la aleación de aluminio 7075 en la condición T7351. La composición química nominal de la aleación es la que se muestra en la Tabla 1 [5]. A su vez, en la Tabla 2, se muestran las propiedades mecánicas medidas en el presente trabajo.

Tabla 1. Composición química de la aleación Al 7075.

%		% Peso		% Peso	
Al	bal	Mg	2.1-2.9	Zn	5.1
Cu	1.2-2	Fe	Máx. 0.5	Ti	Máx. 0.12
Mn	Máx.	Si	Máx. 0.4	Cr	0.18-0.28

Tabla 2. Propiedades mecánicas de la aleación Al 7075.

E (GPa)	Límite elástico (MPa)	Esfuerzo tensil máximo (MPa)	Elongación (%)
72	393	476	8

La orientación en que han sido cortadas las probetas se muestra en la Fig. 3. Como se aprecia, las probetas han sido extraídas desde planchas, con el sentido de laminación perpendicular al eje axial de cada probeta.

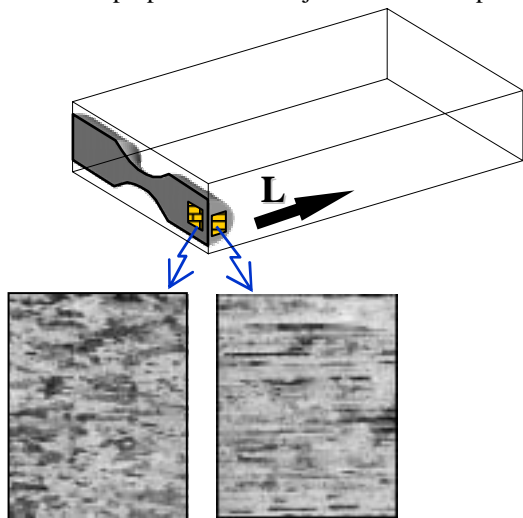


Fig. 3. Orientación de las probetas.

La geometría de las probetas utilizadas ha sido descrita en [2]. La probeta posee una sección transversal variable que obliga a que la fractura se produzca siempre en la zona de menor diámetro, sin una concentración de tensiones considerable. Se utilizó una máquina de fatiga en viga rotatoria del tipo cantilever, a una frecuencia de 100 Hz, con una razón de carga $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = -1$. Se utilizó esta configuración ya que permite que la tensión máxima se presente siempre en la superficie de la probeta permitiendo evaluar de mejor forma las condiciones superficiales.

Los procesos de anodizado se aplican después de desengrasar y decapar las superficies. Para el desengrase se emplea tricloroetileno a 84° C por 5 min, inmersión en solución comercial *TURCO* 4251-S a 60° C por 10 min. con agitación y enjuague con agua bidestilada a temperatura ambiente por 5 min. El decapado que consiste en inmersión en solución comercial *SMUT-GO#4* (30-45 g/l al 10% de ácido nítrico a temperatura ambiente por 5 min. con agitación) y enjuague con agua bidestilada a temperatura ambiente. En un trabajo anterior [6], se informó que el decapado ácido utilizado industrialmente, que es el usado en este trabajo, no produce un cambio en la vida útil de las aleaciones. Esto permite analizar los efectos de los tres tipos de anodizado estudiados, cuyos detalles son:

Anodizado Crómico: Se forma por la inmersión de la pieza en una solución acuosa de ácido crómico ($\text{CrO}_3 + \text{H}_2\text{O}$) y se aplica corriente con la pieza cargada positivamente, obteniéndose capas de Al_2O_3 con espesores de 1.3 a 2.5 μm , de acuerdo a los siguientes parámetros: Concentración de electrolito: CrO_3 48 g/l; Temperatura: 35 °C; Tiempo en el baño: 30 min.; Densidad de corriente: 5.0 mA/cm^2 .

Anodizado Sulfúrico: Se forma por la inmersión de la pieza en una solución acuosa de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y se aplica corriente con la pieza cargada positivamente, obteniéndose capas de Al_2O_3 con espesores de 7.5 a 15 μm , de acuerdo a los siguientes parámetros: Concentración de electrolito: H_2SO_4 al 15%; Temperatura: 25 °C; Tiempo en el baño: 30 min.; Densidad de corriente: 5.0 mA/cm^2 .

Anodizado Sulfúrico-Bórico: Se forma por la inmersión de la pieza en una solución acuosa de ácido sulfúrico y ácido bórico ($\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_3\text{BO}_3$) y se aplica corriente con la pieza cargada positivamente, obteniéndose capas de Al_2O_3 con espesores de 5 a 10 μm , de acuerdo a los siguientes parámetros: Concentración de electrolito: H_2SO_4 0.5M H_3BO_3 0.5M; Temperatura: 25°C; Tiempo en el baño: 30 min.; Densidad de corriente: 10.0 mA/cm^2 .

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Utilizando el método Maennig se construyó los campos *S-N-P* para evaluar el efecto del anodizado en la vida útil de la aleación de aluminio 7075-T7351, utilizando en todos los casos el decapado en medio ácido comercial ya evaluado anteriormente *SMUT-GO#4*, evaluándose el efecto de cuatro condiciones: sin anodizado (sólo desengrase), anodizado en ácido crómico, anodizado en ácido sulfúrico y anodizado en ácido sulfúrico-bórico.

En las Fig. 4, 5 y 6 se muestran las curvas correspondientes a los tres tipos de anodizado estudiados. Se han trazado las curvas de 1%, 50% y 99% de probabilidad de fractura, de acuerdo a la

metodología propuesta por Maennig. Además, en cada caso se ha trazado la curva S-N-P de la aleación sometida sólo a desengrase.

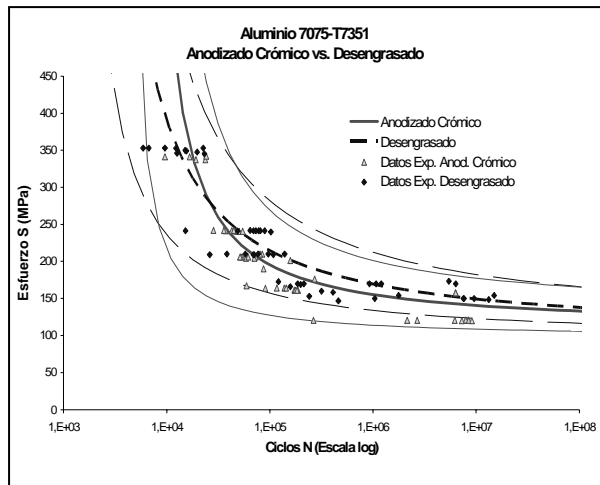


Fig. 4. Curvas S-N-P para Al 7075 T735 con anodizado crómico.

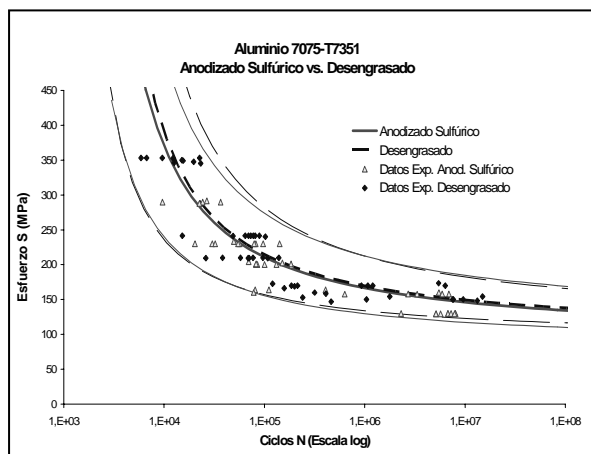


Fig. 5. Curvas S-N-P para Al 7075 T7351 con anodizado sulfúrico.

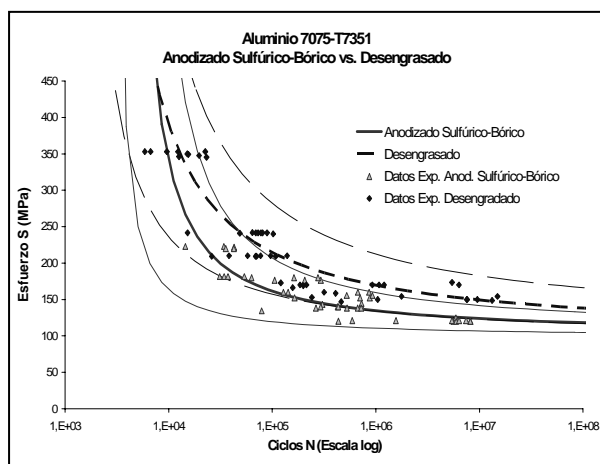


Fig. 6. Curvas S-N-P para Al 7075 T7351 con anodizado sulfúrico-bórico.

La Fig. 4 muestra una leve disminución en la vida útil, en todo el rango de alto número de ciclos. Los puntos experimentales correspondientes al anodizado crómico caen por debajo de la curva de 50% del aluminio desengrasado. Esto está de acuerdo a lo informado en la literatura [6]. La Fig. 5 muestra que el anodizado sulfúrico no genera cambios significativos en la vida útil a fatiga, en relación con la aleación desengrasada. En la Fig. 6 se aprecia una disminución en la vida útil en aquellas aleaciones sometidas a anodizado en mezclas de ácido sulfúrico y bórico.

5. CONCLUSIONES

Los fenómenos de fatiga presentan una componente significativa de dispersión, razón por la cual debe recurrirse a un análisis estadístico de los datos.

El anodizado crómico produce sólo una disminución leve en la vida útil a fatiga, manifestándose en una disminución promedio de 10 MPa.

El anodizado sulfúrico no afecta la vida a fatiga, como ha quedado de manifiesto al examinar los resultados experimentales del presente estudio. Esto hace que el anodizado sulfúrico se una de las mejores alternativas si lo que se pretende es reemplazar el anodizado crómico.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Academia Politécnica Aeronáutica, a la Empresa Nacional de Aeronáutica ENAER y a la Universidad de A Coruña por el apoyo prestado a la presente investigación.

REFERENCIAS

- [1] Valencia N., Influencia en la vida útil a fatiga de los procesos de anodizado en aleaciones de aluminio aeronáuticas, Tesis de Ingeniería Aeronáutica, APA, Chile, marzo 2004.
- [2] Monsalve, A., Valencia, N., Páez, M., Sepúlveda, Y., "Evaluación a fatiga rotatoria de aluminio 2024-T3", Análes de Mec. de la Fractura, 450-455, 2003.
- [3] ASM Handbook, Volume 19 "Fatigue and Fracture". American Society of Materials, 1996.
- [4] López, M. A. "Caracterización a Fatiga de Compuestos Bajo Cargas Aleatorias y Cargas por Bloques". Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, Dpto. de Const. e Ing. de Fab. Gijón, 2000.
- [5] ASM Speciality Handbook, Aluminium and Aluminium Alloys, 1998.
- [6] Valencia N., Monsalve, A., Páez, M., Sáez, M., "Efecto de los Tratamientos de Limpieza Superficial en la Vida Útil a Fatiga de las Aleaciones de Aluminio 7075-T7351, 2024-T3 y 7050-T7451", Anales de Mecánica de la de Fractura, 2001.