EVALUACIÓN A FATIGA ROTATORIA DE ALUMINIO 2024-T3

A. Monsalve*, N. Valencia**, M. Páez*** ,Y. Sepúlveda***,
(*) Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Casilla 10233, Santiago, Chile
amonsalv@lauca.usach.cl
(**) Academia Politécnica Aeronáutica, Departamento de Investigación
(***) Departamento de Química de los Materiales, Facultad de Química y Biología, USACH, Casilla 40, Correo 33, Santiago, Chile.

Resumen. Se determina la curva de Wöhler de la aleación de aluminio 2024 T3 a través del método de Maennig, poniendo énfasis en el análisis estadístico necesario para la determinación del límite de fatiga. Se estudió el efecto del tratamiento superficial de desengrase, que se utiliza en la industria aeronáutica, sobre la respuesta a fatiga de este tipo de material. Este tratamiento de desengrase es el previo a los tratamientos de decapado y anodizado, los que se usan para aumentar la resistencia a la corrosión en este tipo de aleación. Se efectuaron para esto, ensayos sobre viga rotatoria, determinándose las curvas de isoprobabilidad de falla de acuerdo al método ya especificado. La experiencia ha permitido poner a punto la técnica citada para determinar de una manera estadísticamente confiable el límite de fatiga de la citada aleación. Esta experiencia constituye el punto de partida para el estudio de la influencia que ejercen distintos tratamientos superficiales en la respuesta a fatiga de este material. Se realizó un análisis de caracterización de la superficie de fractura por microscopía electrónica de barrido (SEM), encontrándose que el tipo de fractura corresponde al tipo dúctil-frágil, con presencia de cavidades y zonas de microfragilidad.

Abstract. The Wöhler curve of the 2024 T3 aluminum alloy was determined by the Maennig method, with an special emphasis in the statistical analysis in order to determine the fatigue limit. The surface treatment effect of degreased usually used in aeronautical industry over the fatigue response was studied. This degreased treatment is previous to the pickling and anodizing treatments, which are used in order to increase the corrosion resistance of this kind of alloys. Tests over rotatory beams were made, determining the isoprobability of failure curves in accordance to the specified method. The study has allowed to calibrate this technique in order to determine the fatigue limit with a minimum statistical confidence of this alloy. This study constitutes the start point for the study of the influence that different surface treatments produce in the fatigue response of this material. A characterization of the fracture surface by scanning electronic microscopy (SEM) was made, finding a brittle-ductile morphology of fracture, with the presence of voids and microbrittle zones.

1. INTRODUCCIÓN

En el caso de las estructuras aeronáuticas, algunas estadísticas, muestran que aproximadamente el 80% de los accidentes de aviación son debido a errores humanos y que del 20% restante, el 80% son debido a fallos por fatiga. Esto demuestra la importancia que tiene el estudio del fenómeno de fatiga en el mundo aeronáutico. En general, la respuesta a fatiga de los materiales usados en aeronáutica se encuentra relativamente bien caracterizada. Muchas de estas aleaciones se utilizan tratadas superficialmente con el fin de aumentar su resistencia a la corrosión. Sin embargo, debido a la influencia que ejercen estos tratamientos superficiales sobre las propiedades a fatiga, es que se hace necesario un estudio detallado de los efectos que causan dichos tratamientos en las propiedades mecánicas de este tipo de aleaciones.

Pese a que en los últimos años se han hecho notables mejoras en la descripción cuantitativa del fenómeno de fatiga, aún siguen utilizándose con éxito enfoques clásicos. Entre los enfoques modernos, merece destacarse la ecuación de Paris, que entrega una relación entre la velocidad de crecimiento de grieta da/dN y el esfuerzo aplicado. Como ya se mencionó, el enfoque clásico a través de las curvas de Wöhler sigue teniendo validez y utilizándose. Estas curvas relacionan el esfuerzo aplicado con el número de ciclos de vida útil de la pieza ensayada, razón por la que usualmente se denomina a estas curvas, curvas S-N (esfuerzo-número de ciclos). En el contexto de las curvas de Wöhler, un aspecto importante a tener presente es la gran dispersión de datos típica de los ensayos de fatiga. Por esta razón es que una variable importante a tener en cuenta en este tipo de trabajos es la probabilidad de falla, lo cual da origen a las curvas S-N-P. Estas curvas toman en cuenta la dispersión estadística de los resultados provenientes de ensayos de fatiga, y se pueden construir siguiendo una metodología apropiada. En el presente trabajo se

construye una curva S-N-P para una aleación de aluminio 2024 T3 sin tratamiento superficial, es decir, en la condición de desengrase. La importancia del mismo radica en que constituye un punto de partida en la evaluación del daño sufrido por la aleación al ser sometida a tratamientos de decapado y anodizado posteriores.

2. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS DE FATIGA

El aspecto mencionado anteriormente, que hace referencia a la alta dispersión de los resultados experimentales en un ensayo de fatiga, queda reflejado en una curva de distribución de probabilidad de fallas, como la que se muestra en la figura 1. La distribución de probabilidad de falla presenta una función de distribución que puede ser modelada por una distribución normal-logarítmica o bien una distribución de Weibull. En el primer caso, que utiliza dos parámetros, al realizar ensayos de fatiga y representar el número de ciclos de manera logarítmica, se obtiene una distribución normal. El segundo caso, que corresponde a una distribución de tres parámetros, fue planteada en 1949 por W. Weibull y es la distribución natural para fatiga, ya que fue originalmente desarrollada como un modelo de la *teoría del eslabón más débil* aplicada a fenómenos de fatiga.

En la figura 1 se muestran dos materiales con la misma resistencia promedio, pero con distinta desviación. La región de intersección entre la probabilidad debe ser lo suficientemente pequeña como para garantizar una operación segura y lo suficientemente grande, como para hacerla económicamente rentable o, no aumentar demasiado su peso. En el ejemplo de la figura, de seguro la estructura 2 (base material 2) es más riesgosa que la estructura 1 (base material 1), pero a su vez la estructura 1 resultaría más costosa y/o pesada que la 2. En este análisis radica la importancia de realizar estudios de fatiga con el suficiente respaldo estadístico. Como se ha dicho, en el presente trabajo se trazan las curvas S-N-P para la aleación 2024-T3 como los mostrados en la figura 2. Para esto se ha utilizado la metodología propuesta por Maennig, que se resume a continuación.

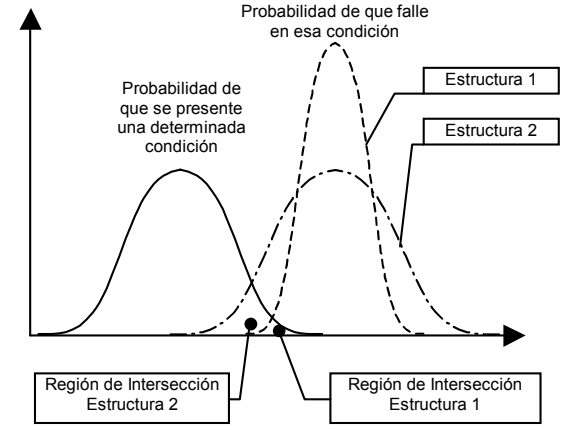


Figura 1. Curvas Probabilidad de falla

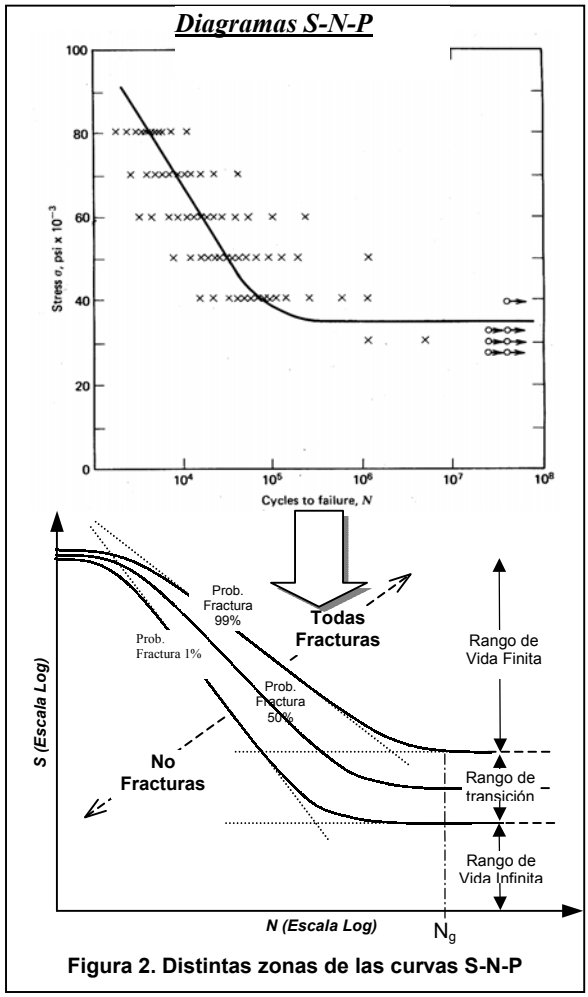


Figura 2. Distintas zonas de las curvas S-N-P

Planeación de los ensayos de fatiga

Un aspecto de especial importancia lo constituye el hecho de que los metales BCC tales como los aceros de baja aleación o no aleados, molibdeno y sus aleaciones y aceros aleados ferríticos, presentan un límite de fatiga como el mostrado en la figura 2.

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 [1].

Algunos investigadores [1], han encontrado que este tipo de materiales también presentan un límite de fatiga en número de ciclos entre 10^{12} y 10^{13} (a 100 Hz ¡¡¡3170 años!!!), pero este nivel de ciclos es tan alto que para efectos prácticos se considera un límite de fatiga tecnológico que es el que se puede medir en ensayos experimentales.

En la literatura se pueden encontrar diversos métodos para trazar las curvas S-N-P [1,2,3], 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.

Método de Maennig

En este método se evalúa en forma independiente el *Rango de Transición* y el *Rango de Vida Finita* (Ver Figura 2), 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. Sin embargo, 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 es siempre una variable dependiente.

Si la distribución de probabilidades a través de una transformación adecuada es factible de ser representada por una recta, 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 (ver Figura 2) 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). Algunos estudios teóricos y experimentales llegan a que la expresión apropiada para fatiga es [1]:

$$P_f = 100\frac{3r-1}{3n+1} \qquad si \quad r \neq 0 \tag{1}$$
$$P_f(r=0) = 0.5 \cdot P_f(r=1) = 100 \cdot (3r+1) \quad si \quad r = 0$$

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

$$D = \left(1 - r/n\right) \cdot d \cdot S_a \qquad si \quad r \leq 0.5n$$
$$D = \left(- r/n\right) \cdot d \cdot S_a \qquad si \quad r > 0.5n \qquad (2)$$

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

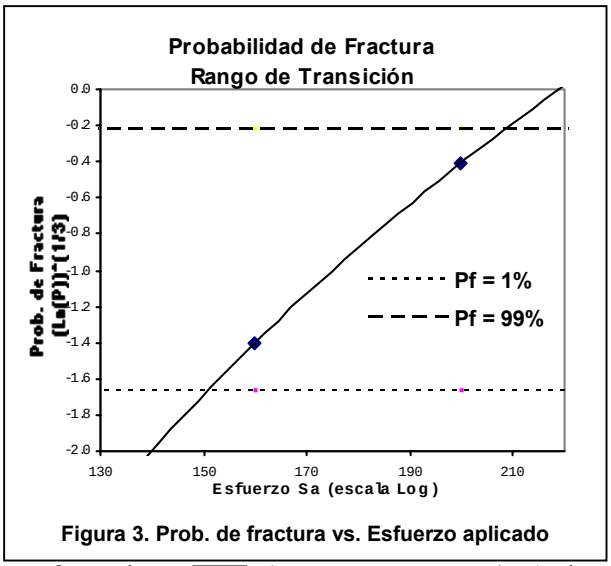


Figura 3. Prob. de fractura vs. Esfuerzo aplicado

transformación $\sqrt[3]{\ln(P)}$ (P en tanto por uno). 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 $\sqrt[3]{\ln(P)}$ que es simple de programar y graficar [3,4]. Un ejemplo se puede apreciar en la

Figura 3 donde fueron evaluados dos niveles de esfuerzo: 160 MPa y 200 MPa.

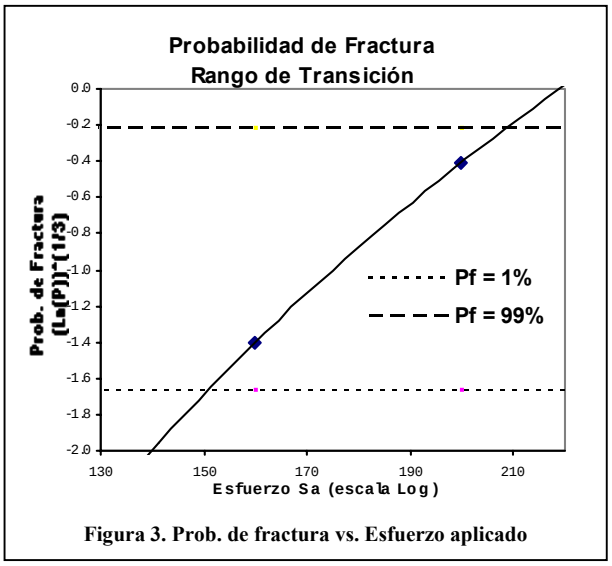


Figura 3. Prob. de fractura vs. Esfuerzo aplicado

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:

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

con lo cual

$$S_a = e^{\left(\frac{\sqrt[3]{\ln\left(P_f/100\right)} - \beta}{\alpha} \right)}, \qquad \text{con } P_f \text{ en \%.}$$

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

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 $\sqrt[3]{\ln(P)}$ siguen siendo las que mejor se ajustan.

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

$$P_f = \frac{i - 0.417}{n + 0.166} \qquad (3)$$

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 $N_{50,2}/N_{50,1} = \varphi = \sqrt{10} = 3.16$, para decisiones de ingeniería y de $\sqrt[3]{10} = 2.16$, para ensayos de alta confiabilidad, luego:

$$\frac{S_{a1}}{S_{a2}} = (\varphi)^{1/K} \qquad (4)$$

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:

$$K = \frac{\log\left(N_{50,1}/N_{50,2)}\right)}{\log\left(S_{a2}/S_{a1}\right)} \qquad (5)$$

Para cada nivel se hace una gráfica como la de la Figura 3 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 [3], que se puede representar a través de:

$$(\log N + B)\cdot(\log S + D) = A \qquad (6)$$

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 figura 2.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material estudiado en el presente trabajo corresponde a la aleación de aluminio 2024 en la condición T3, esto es, solubilizada a 493ºC y luego trabajada en frío, con envejecimiento natural. La composición química nominal de la aleación es la que se muestra en la Tabla 1. 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 2024 T3

	% Peso		% Peso		% Peso
Al	93.5	Mg	1.2-1.8	Zn	Máx. 0.25
Cu	3.8-4.9	Fe	Máx. 0.5	Ti	Máx. 0.15
Mn	0.3-0.9	Si	Máx. 0.5	Cr	Máx. 0.10

Tabla 2. Propiedades mecánicas de la aleación Al 2024

E (GPa)	Límite elástico (MPa)	Esfuerzo tensil máximo (MPa)	% Long.
72	345	485	18

La orientación en que han sido cortadas las probetas se muestra en la figura 4. Como se aprecia,. Las probetas han sido extraídas desde planchas, con el sentido de laminación perpendicular al eje axial de cada probeta.

La geometría de las probetas utilizadas se muestra en la Figura 5. Tal como se aprecia, dicha 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 tal como se muestra en la Figura 5, a una frecuencia de 100 Hz, con una razón de carga $R = \sigma_{mín}/\sigma_{máx} = -1$. 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.

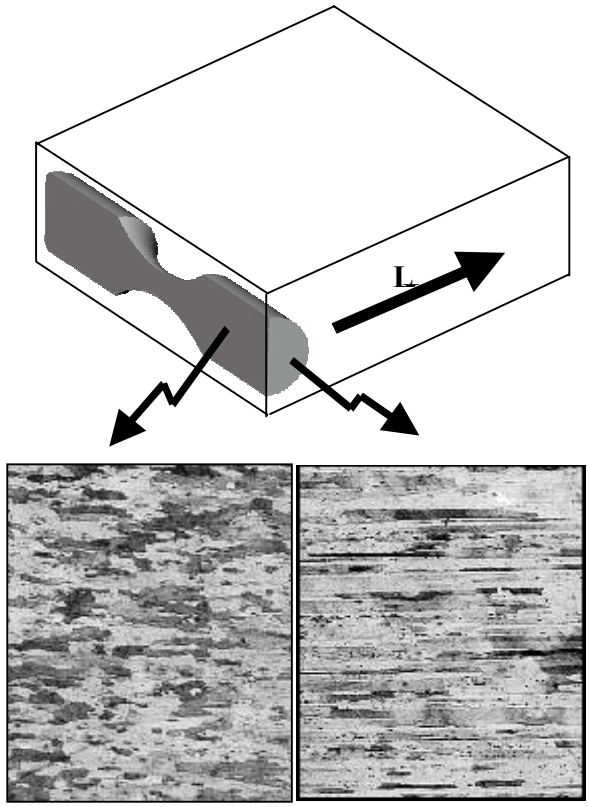


Figura 4 Orientación de Granos en la Probeta

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de la ejecución del ensayo de fatiga completo con un total de 50 probetas se aplicó la metodología de Maennig descrita anteriormente y se obtuvieron las distribuciones de probabilidad. Estas se muestran para el rango de transición en la figura 6 y en el campo S-N-P en la Figura 7, donde se pueden observar las curvas para un 1%, 50% y 90% de probabilidad de fractura. El límite de fatiga para esta aleación según la referencia [4], es de 140 MPa a los $5x10^8$ ciclos. Proyectando las curvas obtenidas experimentalmente, este límite resulta ser de 130 MPa para la curva de 1% de probabilidad de fractura y, 155 MPa para la de 50%.

Análisis Fractográfico

En la caracterización de la superficie de fractura se utilizó un microscopio electrónico de barrido JEOL 5410 en la modalidad de electrones secundarios provisto de análisis EDAX (Energy Dispersive X Ray Analysis).

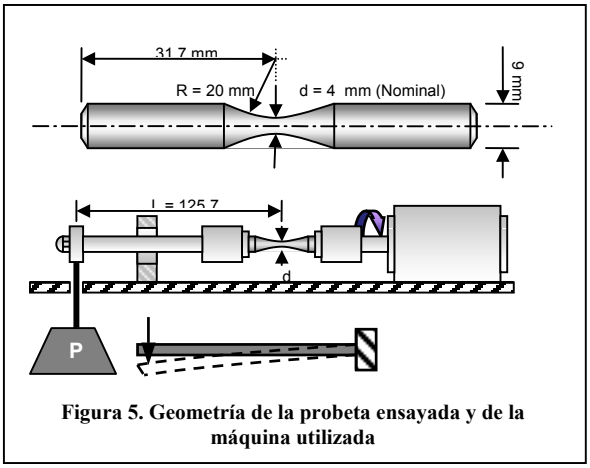


Figura 5. Geometría de la probeta ensayada y de la máquina utilizada

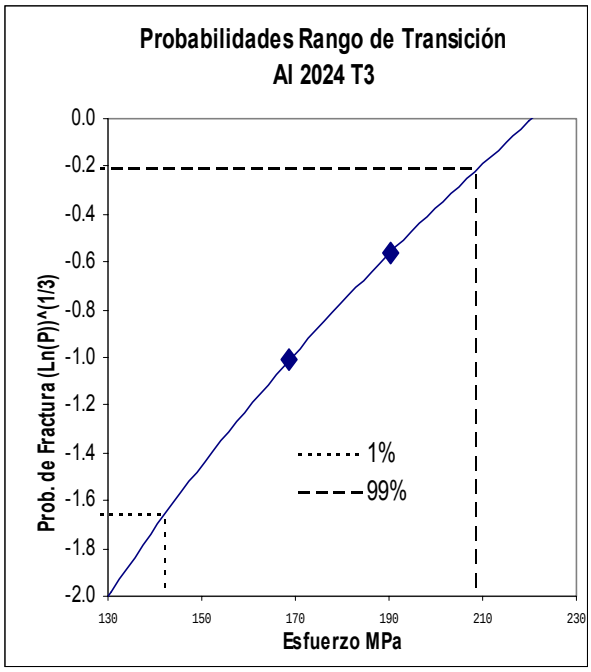


Figura 6. Prob. de fractura vs. Esfuerzo aplicado

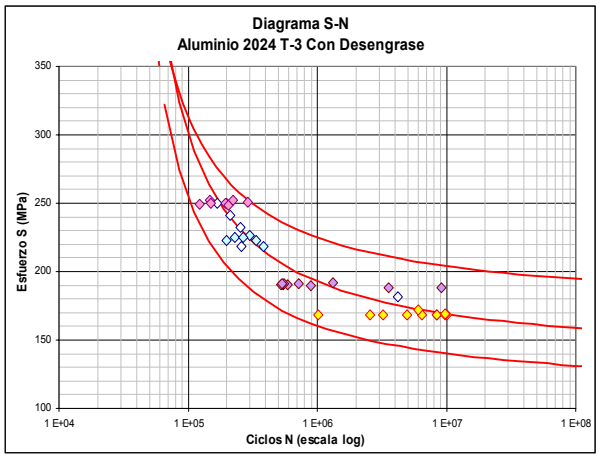


Figura 7. Curvas S-N-P para la aleación en estudio.

En la figura 8 se muestra una imagen a 500 aumentos de la superficie de fractura de una probeta rota a 190 MPa y 532000 ciclos. Se aprecian zonas tanto de microductilidad como de microfragilidad, características en este tipo de aleación, que presenta un comportamiento dúctil-frágil.

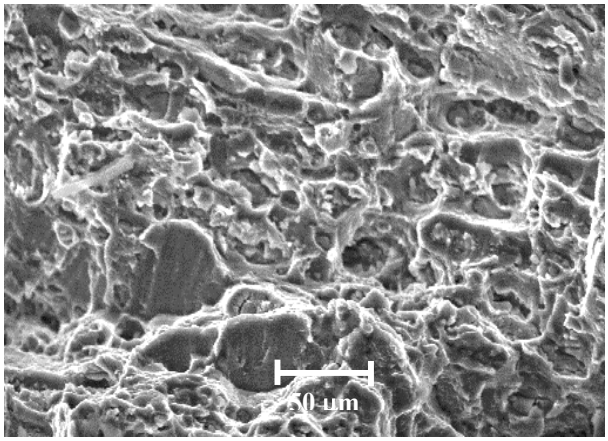


Figura 8. Imagen de la superficie de fractura 500X.

5. CONCLUSIONES

Se logró evaluar la respuesta a fatiga de la aleación de aluminio 2024-T3 de amplio uso en aeronaves, a través del método propuesto por W. Maennig, que permite construir las curvas de isoprobabilidad de fractura con un buen nivel de exactitud y un relativamente bajo número de probetas.

Los resultados obtenidos se encuentran de acuerdo a los resultados publicados por otros autores y permiten iniciar la siguiente etapa de esta investigación que consiste en evaluar el impacto de distintos tipos de anodizado sobre la vida útil a fatiga de distintas aleaciones de aluminios aeronáuticos

6. REFERENCIAS

[1] ASM Handbook, Volume 19 “Fatigue and Fracture”. American Society of Materials, (1996).

[2] Collins J.A., “Failure of Materials in Mechanical Design”.– The Ohio State University. Wiley-Interscience Publication –EE.UU. (1981).

[3] López M. A. “Caracterización a Fatiga de Compuestos Bajo Cargas Aleatorias y Cargas por Bloques”. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, Dpto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación. Gijón, (2000).

[4] AC 25.571-1C “Damage Tolerance and Fatigue Evaluation of Aircraft Structure”. Federal Aviation Administration, (1998).

[5] ASTM Standard E-1150-87 “Standard Definition of Terms Relating to Fatigue”.