



F. Agüera <sup>a/b</sup>, H. Alvarez Villar <sup>a/b</sup>, V. Fierro <sup>a/b</sup>, P. Ratto <sup>b</sup>, A. Ansaldi <sup>b</sup>, E. Ayllón <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Profesores Investigadores de la Facultad de Ingeniería de la UdeMM.

<sup>b</sup> Investigadores de CITEFA, DEIMAT.

# La fatiga: su incidencia en dos casos de análisis de falla

## Resumen

En el análisis de falla de componentes mecánicos, la fatiga presenta una alta incidencia en la cantidad y gravedad de casos. En el presente trabajo, se exponen dos ejemplos donde la fatiga es el fenómeno desencadenante de la falla de piezas de aeronaves.

En el primer caso, una pequeña pieza del motor de un helicóptero ocasionó el bloqueo del mismo y su posterior caída. En el segundo caso, la fatiga había provocado la fisura de elementos de sujeción de los soportes del tren de aterrizaje delantero de un avión de pasajeros tipo "Lear Jet". Los daños originales fueron reparados por soldadura, pero nuevamente la fatiga volvió a fisurar y terminó rompiendo otro elemento no detectado hasta el momento del análisis, lo que provocó un accidente durante el aterrizaje de la máquina.

## Introducción

En el Cuadro 1 se muestra una estadística de casos de análisis de falla de componentes mecánicos; en la misma se aprecia la incidencia de la fatiga como fenómeno determinante de daños y posteriores accidentes.

Cuadro 1

Frecuencia de Mecanismos de Falla		
	Industria Civil y Mecánica	Aeronáutica
Corrosión	29	16
Fatiga	25	55
Fractura Frágil	16	-
Sobrecarga	11	14
Oxidación a alta temperatura	7	2
SCC/HE/Corrosión Fatiga	6	7
Creep	3	-
Desgaste/Abrasión/Erosión	3	6

## La fatiga: descripción del fenómeno

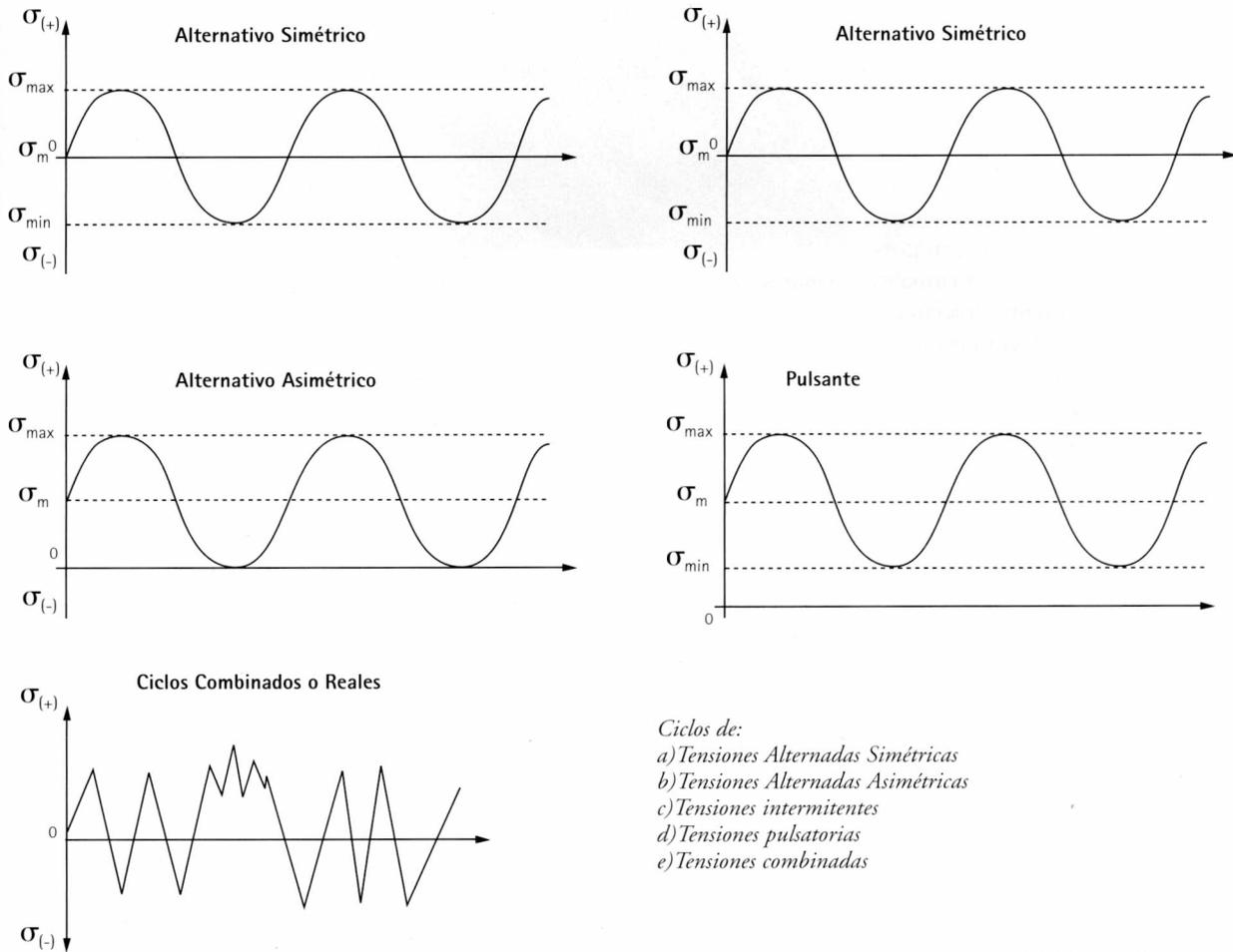
Como fenómeno físico, la fatiga se produce cuando se somete un elemento a tensiones cíclicas un repetido número de veces, que van desde millones a unos pocos ciclos, las tensiones son dinámicas y fluctuantes. En la Figura 1 se presentan diferentes gráficas de tipos de ciclo, que pueden aplicarse a una pieza o conjunto. La forma de la onda puede ser: senoidal, cuadrada, triangular, diente de sierra o una combinación de cualquiera de ellas.

Los valores de las tensiones pueden ser inferiores al límite de fluencia, en cuyo caso se habla de Fatiga de Alto Número de Ciclos. En algunos materiales

es posible determinar un umbral de tensiones para el cual el número de ciclos necesarios para producir la fisura y posterior rotura de la pieza es superior a  $10^7$  ciclos, valor al cual puede catalogarse como Vida Infinita del elemento. En la Figura 2 se muestra el ejemplo de dos materiales que responden a comportamientos como los mencionados anteriormente.

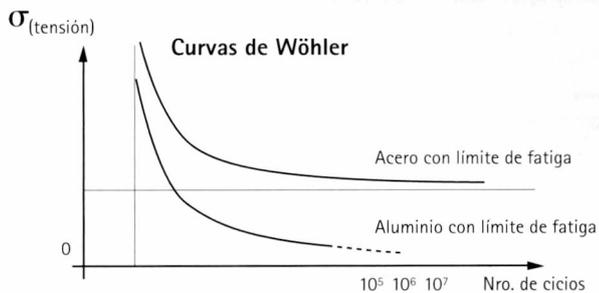
Hablando rigurosamente, nunca un elemento de máquina sometido a fatiga tendrá una vida infinita, pero a los fines prácticos, este valor es bastante aceptable. Cuando las tensiones a las que es sometida la pieza son superiores al límite de fluencia del material, se habla de Fatiga de Bajo Nú-

Figura 1



- Ciclos de:
- a) Tensiones Alternadas Simétricas
  - b) Tensiones Alternadas Asimétricas
  - c) Tensiones intermitentes
  - d) Tensiones pulsatorias
  - e) Tensiones combinadas

Figura 2



- Esquema de curvas de fatiga o curva de Wöhler, de dos materiales,
- a) acero que presenta límite de fatiga,
  - b) aluminio sin límite de fatiga.

mero de Ciclos. Cuando ocurren roturas por Fatiga de Bajo Número de Ciclos, normalmente se trata de casos donde las tensiones están fuera de control accidentalmente o bien hay gruesos errores de diseño. Cabe acla-

rar que en piezas de responsabilidad, se realizan experiencias de laboratorio, controles de calidad, seguimiento y procesamiento estadístico, tendientes a minimizar las incertezas provenientes de los defectos propios de los

materiales y procesos de elaboración. De cualquier forma siempre se toman los valores más conservadores y se los afecta de los coeficientes de seguridad acorde a las prestaciones del elemento de máquina.

### Razones para realizar el análisis de falla

El estudio de casos particulares de Análisis de Falla provee elementos de inferencia para conocer el comportamiento en servicio de elementos de máquinas. De esta manera se acumulan elementos de juicio que sirven para mejorar el diseño, prever comportamientos, dictar normas, manuales de uso y mantenimiento, esclarecer accidentes, explicar comportamientos, corroborar o descartar teorías. El análisis de falla involucra una serie de herramientas tanto teóricas como experimentales. El uso de instrumentos y técnicas de laboratorio complementa el razonamiento del investigador, que aplica su experiencia y conocimientos generales al caso particular.

Por otra parte, es necesario realizar informes muy claros y convincentes para que las personas que fueron actores del accidente puedan tener certeza de las causas y la sucesión de hechos, y las autoridades que intervienen en las etapas de prevención y reparación de daños posean elementos de valoración al momento de emitir sus dictámenes, modificar normas o dictar sentencia.

### CASO N°1:

#### Rotura de un Platillo de Válvula de un motor de helicóptero

El estudio de la rotura del elemento de referencia, se inicia a partir de los trozos rescatados luego del accidente por personal de la Junta de Investigación de Accidentes de Aviación Civil – JIAAC. En las Figura 3a y b se ven respectivamente la pieza armada para su análisis y un detalle de una de las partes, mostrando fisuras que no llegaron a la rotura.



Figuras 3a: Platillo de válvula reconstruido



Figura 3b: Detalle de una pieza fracturada

### Descripción y funcionamiento de la pieza

La función del platillo es la de soportar los resortes de válvulas. En el esquema de la Figura 4, se ve la posición del elemento dentro del conjunto que realiza la apertura y cierre de válvula. Normalmente al armarse el conjunto, el platillo queda comprimiendo los resortes, que al girar el árbol de levas y mover el balancín trasmite al eje de la válvula un movimiento alternativo que comprime aun más los resortes hasta una posición extrema. Los ciclos de tensión son absorbidos por el platillo de válvula en los asientos de los resortes y en su núcleo donde va alojada una pieza partida conocida en el ambiente mecánico como nuez. La nuez vincula el platillo con el vástago de la válvula y tiende a abrir el agujero cen-

tral del platillo de válvula. El contacto entre la nuez de vinculación, entre el platillo y el vástago de la válvula produce las tensiones cíclicas aplicadas en la pieza, que derivan en la sollicitación a la fatiga (ver Figura 5).

### Consideraciones sobre el material

A través de la composición química y la metalografía del material se determinó que el platillo de válvula estaba construido de un acero conocido como de "corte libre" (free cutting). En las metalografías de las Figuras 6a y b, se puede observar una capa superficial, debida a un tratamiento térmico que tiene un espesor promedio de 0,4 mm. En las mismas figuras se ve con claridad, el "bandedo" de la estructura y la segregación de sulfuro de manganeso.

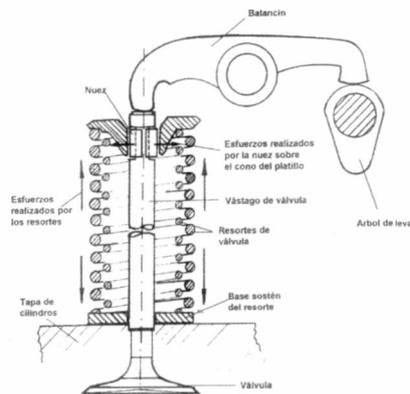


Figura 4: Esquema del platillo de válvula y elementos relacionados

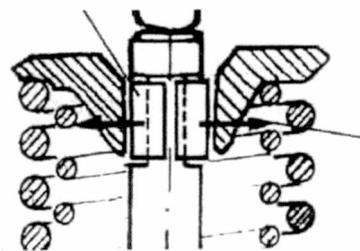
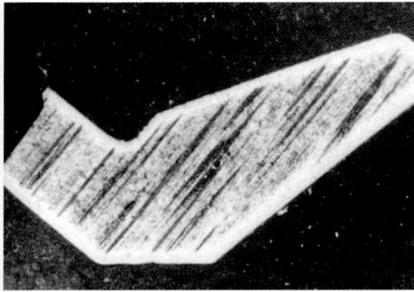
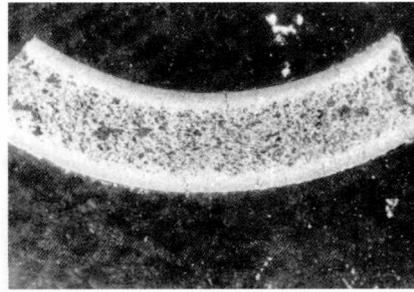


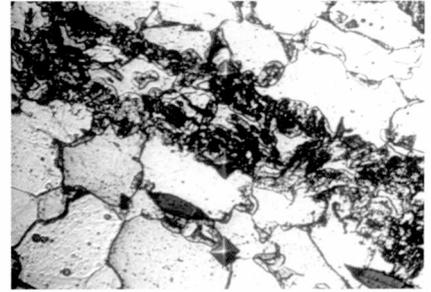
Figura 5: Detalle de conjunto de platillo, nuez y resortes de válvula. Se indica con flechas negras el sentido del esfuerzo que ejercen las parte de la nuez sobre el agujero central del platillo.



**Figuras 6a:** Se muestra bandeo de estructura y las segregaciones del material, en cortes longitudinal.



**Figura 6b:** Se muestra bandeo de estructura y las segregaciones del material, en cortes transversal.



**Figura 7:** Se observa la diferencia de aspecto del bandeo, debido a la composición química. Las marcas regulares son producidas por el indentador de microdureza Vickers.

Al realizar el análisis por EDAX de las zonas bandeadas se determinó la composición de las zonas claras y oscuras (ver Figura 7). Además de tener distintas composiciones químicas, presentan una diferencia de durezas de aproximadamente 300 Hv (matriz metálica) a 100 Hv (sulfuros segregados).

### Perfil de microdureza

Como muestran las Figuras 8a y b, las determinaciones hechas con un microdurómetro Vickers marca LECO, provisto de un indentador piramidal de diamante y usando una carga de 25gf, muestran que la dureza es muy elevada en la superficie de la pieza y luego disminuye hacia el centro de la misma.

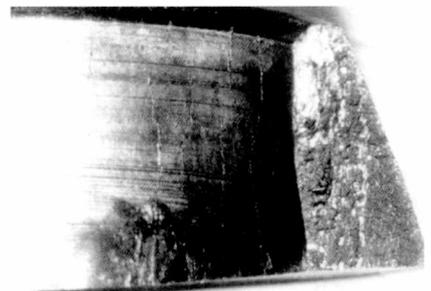
Mediante microscopía óptica se observó que la superficie dura era de es-

tructura martensítica, lo que justifica la alta dureza, mientras que el núcleo presenta la dureza del material original, donde se ve una estructura de ferrita y perlita, con gran cantidad de inclusiones donde preponderan los sulfuros de manganeso, característicos de estos aceros, pero que determinan pobres propiedades mecánicas. En los gráficos se aprecia que la diferencia de dureza es del orden de 600 Hv entre la superficie endurecida y el núcleo blando.

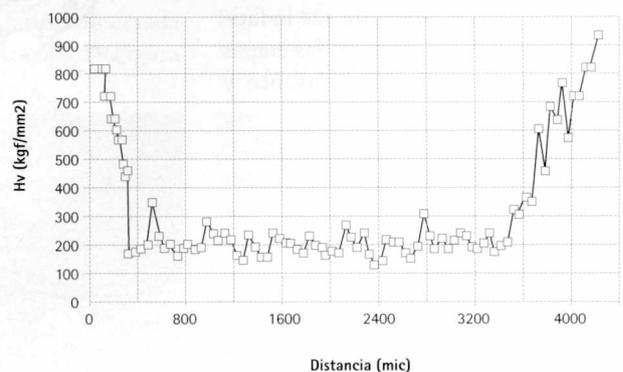
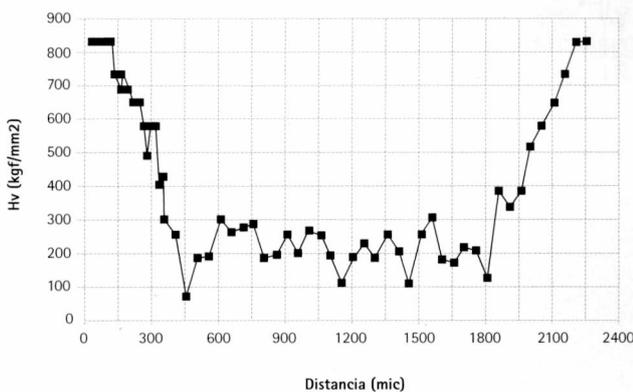
### Fractografía

En la Figura 9 se tiene una vista de la superficie de fractura. Se observa que está dañada por rozamiento producido previamente a la fractura. Como muestra la Figura 9, también había una gran cantidad de fisuras dentro del agujero

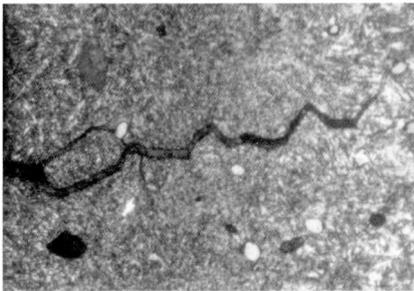
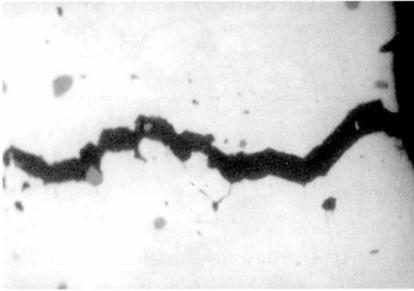
central de la pieza. En las Figuras 10a y b se ven detalles de dichas fisuras que crecían a partir de la superficie interna de la pieza y son similares a la que se transformó en crítica.



**Figura 9:** Frente de la superficie de fractura. Se nota un brillo en la zona superior, debido al rozamiento de las superficies producidos durante los cierres y aperturas de la fisura. También hay inicios de fisuras en la zona interior de la pieza.



**Figuras 8a y 8b:** Gráficos de microdureza, según cortes longitudinales y transversales del platillo de válvula.



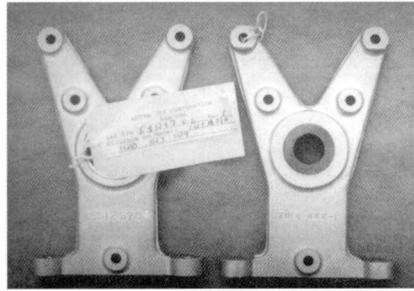
**Figuras 10a 10b:** Detalle del avance de las fisuras, en las probetas sin ataque y con ataque respectivamente.

En la observación al microscopio óptico, se pudo comprobar que las fisuras son intergranulares y bordean las inclusiones. Dada la distribución de las fisuras en toda la pieza se infiere que la falla es general y no responde a una zona localizada.

**Comentarios y análisis del caso**

El caso presenta diferentes aspectos que parecen ser concurrentes para que la falla se produjera. Puntualizaremos los más relevantes:

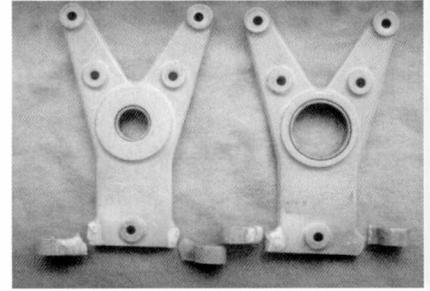
- La causa desencadenante fue la fatiga del material que cumplió las etapas de nucleación de la fisura, avance y colapso del elemento.
- La pieza presenta el aspecto de haber soportado un uso intenso, lo que nos dice que sufrió un altísimo número de ciclos de tipo pulsante. Si bien no se pudo acceder a la información precisa sobre el tiempo de uso del elemento, las marcas de rozamiento y el aspecto general indican que se habrían sobrepasado las horas de uso y no recibió



**Figuras 12:** Piezas de reemplazo, usadas en lugar de las accidentadas.

mantenimiento adecuado. En general las aeronaves son inspeccionadas con regularidad y se realizan cambios preventivos de las piezas críticas. En el caso analizado una inspección predictiva hubiera indicado la necesidad de reemplazo de los elementos en análisis.

- En lo que al material se refiere, hay varios aspectos a criticar, como por ejemplo el uso de un acero de corte libre, que normalmente se usa para elementos de poca responsabilidad mecánica y nunca en un componente crítico como resultado ser el platillo de válvula.
- La diferencia de dureza entre la ca-



**Figuras 13:** Aspecto de las piezas siniestradas

pa endurecida (Hv 800) y el cuerpo del platillo (Hv 200) facilitó la iniciación de las fisuras, por un efecto de falta de resistencia en el respaldo de la capa dura y frágil.

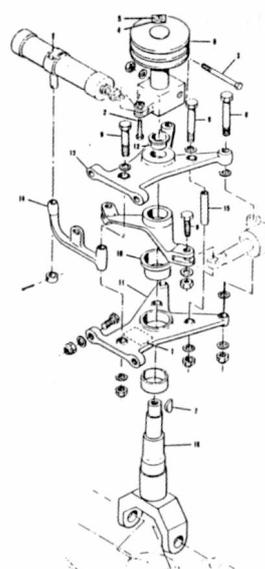
- El material del núcleo, de grano grueso y con alto número de inclusiones, presentaba bandas de segregaciones y fuerte orientación (fibrado), que atentan contra el buen desempeño a la fatiga.
- Las zonas brillantes del interior del platillo, indican que hubo rozamiento entre la nuez y el platillo. Esto no debería haber ocurrido, a menos que la tensión del resorte no fuera suficiente, en cuyo caso la relación entre carga mínima y máxima, denominada (R), es más severa para el elemento que la prevista en el diseño.

**CASO N°2**

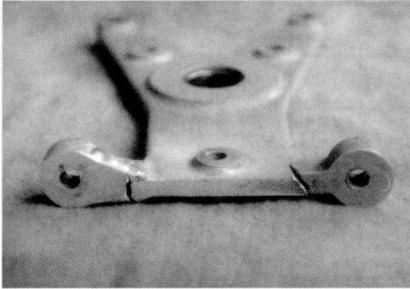
**Falla del Soporte de Dirección de un avión en aterrizaje**

Las piezas que se analizan, construidas en aleación de aluminio, forman parte del sistema de dirección para maniobras en tierra que posee la aeronave (ver Figura 11).

Dicho sistema está relacionado con el tren de aterrizaje localizado en la nariz del mismo. En la Figura 12, se muestran las dos piezas nuevas que reemplazaron a las dañadas.



**Figuras 11:** Esquema del conjunto de tren delantero de la aeronave, donde se ve la posición de las piezas dañadas en el accidente.



**Figuras 14:** Vista de frente de la pieza donde comenzó el accidente, precisamente en el soporte del lado derecho.

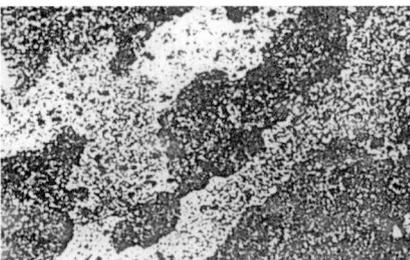
Las piezas reemplazadas ya habían sido reparadas por soldadura, en dos de sus orejas de soporte (ver Figura 13).

Al recibirse las piezas accidentadas, la primer impresión fue que las soldaduras eran las causantes del accidente, pero con el análisis minucioso del caso se vio que era una oreja soporte sana la que inició la cadena de sucesos que terminaron con el conjunto destruido y el posterior despiste del aparato (Figura 14).

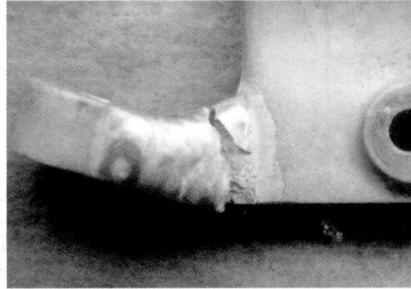
En las Figuras 15a y b se ve el detalle de uno de los soportes fracturado y se lo compara con una pieza con la oreja soporte sana.

**Material, tratamiento térmico y proceso de elaboración**

Las piezas originalmente fueron construidas con aluminio tipo AA2024 con un tratamiento térmico T4, correspondiente a una tasa de enfriamiento lento de normalizado (en aire calmo). La composición química de esta aleación



**Figuras 16:** Micrografía de la aleación de aluminio AA2024 - T4



**Figuras 15a 15b:** Detalle de un soporte soldado roto, comparado con una pieza sana

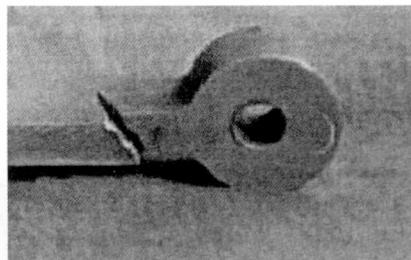
es: Al 92%; Cu 4,9%; Mg 1,7%; Mn 0,6%; Si 0,8 %. La Figura 16 muestra la metalografía de la aleación base. Las soldaduras de las orejas soporte reparadas fueron efectuadas con otra aleación de Al 85% y Si 15%.

El material base poseía una dureza de 128 Hv, que corresponde a una resistencia a la tracción de aproximadamente 45kg/mm<sup>2</sup>, mientras que el material de aporte tenía 88 Hv que equivale a unos 30 kg/mm<sup>2</sup>.

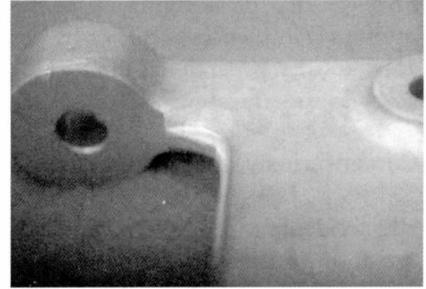
**Fractografía**

La observación de las piezas dañadas, muestra que las orejas soporte que estaban soldadas presentan rotura por desgarro debido a sobrecargas, mientras que la rota por fatiga, en un ángulo de 45° con respecto a la posición horizontal, que es la que tiene en servicio, no estaba soldada.

La superficie rota por fatiga, observada mediante lupa estereoscópica (Figura



**Figuras 17:** Detalle de la fractura por fatiga de la oreja soporte, rota a 45



18), muestra un "abanico" que corresponde al avance de la fisura, donde se ven las marcas de playa o "beach marks". Estas marcas se deben a los cambios de frecuencia e intensidad de las tensiones, generadas por el carreo durante los despegues y aterrizajes de la aeronave. Luego de las marcas de fatiga se tiene una zona de crecimiento de la fisura en forma rápida y luego catastrófica. Como se observa en la figura las marcas de fatiga se originan en las imperfecciones dejadas por una herramienta de amolado usada para reparar las piezas accidentadas.



**Figuras 18:** Detalle en color claro del avance de la fisura por fatiga, mostrando el aspecto de abanico

**Figuras 19:** Detalle de las marcas de amolado que originaron el crecimiento de la fisura por fatiga

En el gráfico de la figura 20 se demuestra la influencia perniciosa de las entallas que generan las marcas de acabado superficial.

### Comentarios y análisis del caso

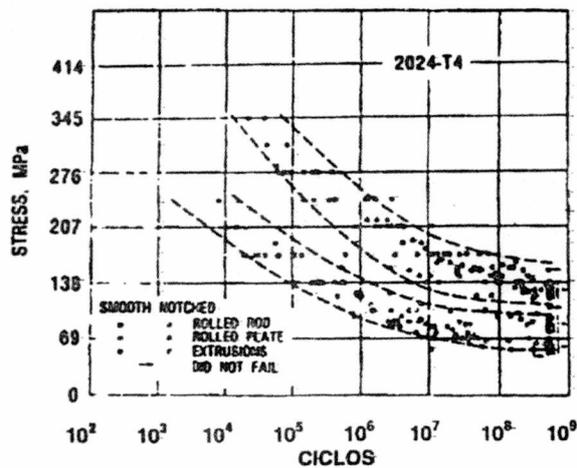
- El accidente se produjo en condiciones normales de aterrizaje, no se informaron detalles de sobrecargas de ninguna especie, como por ejemplo: caída brusca del aparato, vientos anormales o daños en la pista. Se encontró que el material correspondía a los usos habitualmente para estas prestaciones, con una metalografía y composición química dentro de normas.

- Los investigadores determinaron que la causa iniciadora del accidente fue el avance de una fisura, debido a la fatiga.

- Dicha fisura comenzó en una marca de amolado de la rebaba de forja, fue avanzando hasta tomar un tamaño crítico, según puede verse en las diferentes marcas de playa de la Figura 18, y luego rompió por colapso plástico. El resto de las orejas soporte rompió posteriormente por sobrecarga, al tener que soportar sobrecargas debido a la rotura del primer elemento.

- Experiencias de laboratorio realizadas con materiales de las mismas características del aluminio 2024-T4, demuestran la importancia del acabado superficial, encontrándose que las piezas con defectos superficiales tienen una resistencia a la fatiga igual a la mitad de las que tienen un acabado superficial fino.

- Otro aspecto que se observó, fue la pequeña área necesaria para que la fisura entrara en crítico (aproximadamente 5% del área fracturada). Esto nos habla de un diseño muy ajustado, donde el coeficiente de seguridad fue escaso o nulo. En tal caso debió elegirse otro material de mayor resistencia a la fatiga o bien modificar el di-



Figuras 20: Gráfico donde se muestra la influencia de la terminación superficial

seño, de tal forma que las tensiones fueran menores en las secciones comprometidas.

### Conclusiones

- La fatiga es un fenómeno de alta incidencia en fallas mecánicas, se conocen algunos mecanismos y en muchos casos se han valorado la incidencia de factores, individualmente y combinados.

- Es muy peligrosa la combinación de factores, como son: entallas, marcas, cambio de secciones, empalmes, cambios de estructuras metalográficas, ambientes corrosivos, superficies decarburadas, intermitencia de rangos de temperatura (fatiga térmica) y otros, ya que se produce la potenciación de los efectos.

- La prevención de fallas por fatiga comienza en el gabinete de diseño, buscando los materiales adecuados. Téngase en cuenta el caso del platillo de válvula del motor de helicóptero, donde se parte de un material inadecuado, combinados con el análisis de tensiones y el criterio ingenieril. El segundo caso analizado en este trabajo es un claro ejemplo al respecto.

### Agradecimientos

Los autores, agradecen los aportes del

Ing. Cptán. Horacio Larrosa y demás miembros de la Junta de Investigaciones de Accidentes de Aviación Civil – JIAAC. Asimismo al personal del Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas de las Fuerzas Armadas - CITEFA - Técnicos de Microscopía Electrónica Dante Giménez y Alejandro Reynoso. También nuestro reconocimiento al Ing. Aníbal Vettorel, por su colaboración en los gráficos y fotografías.

### Bibliografía

- Findlay, S. J. and Harrison, N. D. Why Aircraft Fail. MATERIAL TODAY, November 2002.
- Page, R. A. Guidelines for Forensic Analysis of Failed Parts, Technical Report. GMRC, 2000.
- Callister Jr., William D. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Vol. 1, Ed. Reverté, S.A. 1997.
- Metal Handbook Vol. 7, 8va edición, 1972
- Atlas of Stress-Strain Curves, Edited by H. E. Boyer, ASM 1987
- Atlas of Fatigue Curves, Edited by H. E. Boyer, ASM 1986
- Aluminium, Vol. 1. Edited by K.R. Van Horn, ASM 1968
- Westwind1123, Illustrated Parts Catalog.
- Fracture, Vol. 6 Edited by H. Liebowitz, Academic Press 1969.