



**Revista Internacional de Investigación e Innovación
Tecnológica**

Página principal: www.riit.com.mx

Resistencia a la fatiga por flexión rotativa y por torsión del aluminio 6063-T5

Fatigue endurance of the 6063-T5 aluminum under torsion and rotating bending

Ávila-Ambriz, J.L., Domínguez-Almaraz, G.M., Verduzco-Juárez, J.C., Correa-Gómez, E.

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. Facultad de Ingeniería Mecánica. Edificio W de Ciudad Universitaria. joavam@hotmail.com, dalmaraz@umich.mx, julio_glenn83@yahoo.es, etrasmo@gmail.com

Innovación tecnológica: Confrontación de la resistencia de una aleación de aluminio en dos modos de aplicación de carga dinámica: Fatiga por torsión VS fatiga por flexión rotativa.

Área de aplicación industrial: Diseño mecánico, diseño de estructuras, industria aérea y automotriz.

Recibido: 29 julio 2016.

Aceptado: 13 octubre 2016.

Resumen

Este trabajo trata sobre el estudio de la fatiga en condiciones de flexión rotativa y por torsión de la aleación de aluminio 6063-T5. Se observó con especial atención la reducción de la resistencia a la fatiga de esta aleación en los ensayos de torsión, con respecto a los ensayos de flexión rotativa. La máquina utilizada para los ensayos de fatiga fue diseñada y construida por los autores y ha sido publicada previamente; los niveles de esfuerzo aplicado a los ensayos fueron del 60%, 70%, 80% y 90% del límite elástico para flexión rotativa y del esfuerzo de cizalladura para los ensayos de fatiga por torsión.

Los ensayos de fatiga por torsión fueron a una frecuencia de 10 Hz y una relación de cambio $R = 0$; mientras que los ensayos por flexión rotativa fueron obtenidos a una frecuencia de 50 Hz y $R = -1$. Los resultados revelan una notable reducción de resistencia a la fatiga bajo torsión, comparada con la pieza sometida a flexión rotativa. Vida en fatiga, iniciación de grieta y los mecanismos de su propagación fueron analizados para las dos modalidades de ensayos de fatiga. El presente trabajo permitiría ampliar el campo de aplicaciones de la aleación en estudio, al conocer más profundamente el comportamiento bajo fatiga.

Palabras clave: Fatiga por torsión, Fatiga por flexión rotativa, Aleación de aluminio 6063-T5, Inicio y propagación de grieta.

Abstract

This work deals with torsion and rotating bending fatigue endurance of AISI 6063-T5 aluminum alloy. Special attention was devoted to fatigue endurance reduction under torsion fatigue testing on this material, in regard to rotating bending tests. The used machine for fatigue tests was designed and constructed for the authors and has been published previously; the applied stress level to tests were of 60%, 70%, 80% and 90% of elastic limit for rotating bending and shear stress for torsion fatigue tests.

Torsion fatigue tests were carried out at frequency of 10 Hz and load ratio $R=0$; whereas rotating bending fatigue tests were at 50 Hz and $R = -1$. Results reveal a noticeable fatigue endurance reduction under torsion compared to rotating bending loading. Fatigue life and crack propagation were analyzed for both fatigue testing modalities. The present work would allow enlarge the field of applications of such alloy, knowing more deeply the behavior under fatigue.

Keywords: Torsion fatigue, Rotating bending fatigue, 6063-T5 aluminum alloy, Crack initiation and propagation.

Nomenclatura

R: Razón de carga

r: Radio

#: Número de ciclos

mm: Milímetros

N: Newton

MPa: Mega Pascal

σ_a/σ_y : Esfuerzo de cedencia

GPa: Giga Pascales

τ_a/τ_y : Esfuerzo de cizalladura

1. Introducción

El alto potencial de las aleaciones de aluminio como materiales estructurales requiere el conocimiento de sus propiedades mecánicas; dichas aleaciones han sido usadas en un creciente número de nuevas estructuras o proyectos de recubrimiento, como torres de antenas, estructuras de aviones, puentes, industria automotriz, domos de gran envergadura, estructuras en áreas con temperaturas extremadamente bajas, etc. [1-3]. Además ha sido señalado por varios autores que el uso potencial de aleaciones de aluminio, no concuerda con los beneficios obtenidos hoy en día por sus aplicaciones. Asimismo, la combinación de su resistencia relativamente alta en relación a su propio peso, alta durabilidad y disponibilidad, alta resistencia a la corrosión [4-5], y su bajo costo hacen de las aleaciones de aluminio una excelente opción para una amplia variedad de aplicaciones estructurales. La pertinencia de estudiar la aleación 6063-T5 es debido a su gran

disponibilidad en el mercado, siendo la aleación de aluminio más comúnmente producida por extrusión en los estados unidos [6], además de presentar una alta resistencia a la corrosión y buena soldabilidad combinada con buena resistencia a la fatiga, lo cual conduce a variadas aplicaciones industriales, tales como: tuberías para sistemas de riego, marcos de puertas y ventanas, componentes y conductores eléctricos, barandales y muebles, intercambiadores de calor, torres de antenas, estructuras con aplicaciones donde la temperatura sea extremadamente baja, etc.

La principal contribución de este estudio es la confrontación entre la resistencia de fatiga en torsión contra la resistencia a la fatiga por flexión rotativa en esta aleación de aluminio, ambas bajo mismas condiciones de esfuerzo.

Las propiedades físicas y mecánicas de las aleaciones de aluminio son de principal interés en aplicaciones industriales. El uso

de fundiciones de aleaciones de aluminio en aplicaciones estructurales automotrices está creciendo rápidamente debido a la necesidad de reducción de peso [7], o el uso de aleaciones de aluminio en la industria aeronáutica [8]. En investigaciones recientes [9-10], se ha reportado que la carga requerida para inducir una fractura en ensayos de fatiga por torsión es menor comparada con la carga necesaria para inducir una fractura en ensayos de fatiga por carga axial. Esto último puede ser atribuido al alto gradiente de tensión o fuerza motriz en especímenes a torsión, comparados con los especímenes ensayados con carga axial. Para el presente estudio, una nueva máquina de torsión [11] ha sido construida en nuestro laboratorio a fin de obtener los resultados que aquí se muestran.

2. Materiales y métodos

La descripción general de la máquina de torsión desarrollada, misma que se encuentra en proceso de solicitud de patente, se muestra a continuación:

- Un servomotor es usado para comunicar el movimiento de rotación al eje principal por medio de una cadena y estrellas, como se ilustra en la Figura 1.
- El servomotor es controlado por medio de un programa desarrollado en la plataforma “Robotis”, permitiendo la transmisión de movimiento rotativo con una precisión de ± 0.088 grados.
- El eje vertical conecta con el espécimen de prueba mediante un mandril que transmite el movimiento de torsión; la parte inferior del espécimen se sujeta a un mandril fijo.
- Un actuador lineal permite comunicar movimiento lineal a la base que sujeta el mandril fijo, a fin de transmitir una flexión y de este modo, desarrollar ensayos de fatiga por combinación flexión – torsión.
- El ensayo se detiene de manera automática, esto se logra mediante continuidad de corriente: el servomotor es accionado mediante una señal eléctrica de continuidad de corriente a través del espécimen de prueba: cuando ocurre un fallo por torsión, la corriente es interrumpida a lo largo de la probeta permitiendo el paro automático del servomotor.
- El conteo de ciclos de torsión se hace mediante un contador eléctrico, el cual es conectado en serie a la continuidad de corriente del espécimen. Bajo una falla por torsión, la corriente es interrumpida y el contador de ciclos se detiene.

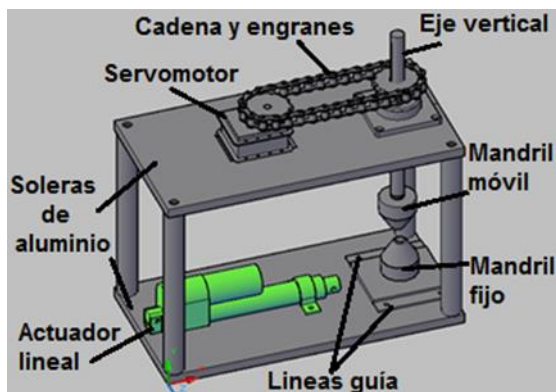


Figura 1. Desarrollo de una máquina de ensayos de fatiga por torsión y por combinación torsión-flexión. (En proceso de patente 2016).

La composición química en peso, y las principales propiedades mecánicas del material de prueba se muestran en las Tablas 1 a) y b), respectivamente. Las probetas para los ensayos de fatiga por flexión rotativa y por torsión con dimensiones en milímetros se muestran en la Figura 2 a) y b), respectivamente. Debe hacerse notar que las dimensiones de las probetas para los ensayos en flexión rotativa fueron diferentes respecto a la norma ISO 1143-2010, a fin de inducir un alto esfuerzo en la sección estrecha de 60, 70, 80 y 90% del esfuerzo de cedencia de este material. Los ensayos de fatiga por flexión rotativa fueron obtenidos en un estudio previo [12], a una frecuencia de 50 Hz y una relación de cambio $R = -1$. Por otro

lado, los ensayos de fatiga por torsión fueron obtenidos recientemente a una frecuencia de 10 Hz y una relación de cambio $R = 0$. Acerca de la rugosidad superficial, todos los especímenes fueron maquinados de manera similar a fin de mantener la rugosidad superficial sin una gran variación; el parámetro de rugosidad R_a (promedio aritmético de valores absolutos) fue cercano a las $10\mu\text{m}$ para todas las probetas.

Tabla 1 a). Composición química en peso (%) de la aleación de aluminio 6063 – T5.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.3–0.6	0.35	0.1	0.1	0.4–0.85	0.1	0.1	0.1	>96.9

Tabla 1 b). Principales propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6063 – T5.

Límite elástico	Esfuerzo último de tensión	%	Módulo de Young	Dureza	Módulo de corte	Resistencia a la cizalladura
MPa	MPa	Elongación	GPa	Brinell	GPa	MPa
145	187	0.33	68.9	60	25.8	117

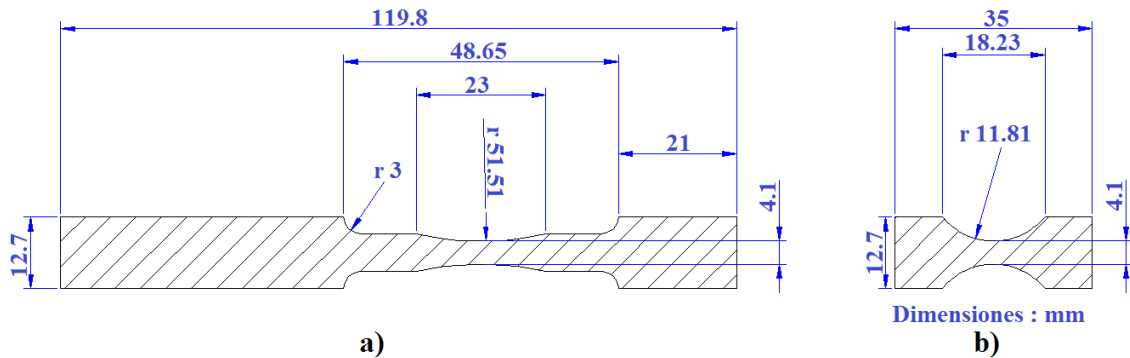


Figura 2. a) Dimensiones de las probetas (mm) para ensayos de flexión rotativa, y b) para probetas de torsión.

Esta máquina de fatiga por torsión, es una de las pocas máquinas de fatiga del mundo capaces de desarrollar diferentes ensayos: torsión, flexión pura, y combinación torsión – flexión. La Figura 1 muestra el servomotor y el actuador lineal que comunican el movimiento de torsión y flexión, respectivamente. Ambos trabajan con un voltaje de 12V DC y son controlados por la tarjeta CM-900; esta es, un circuito

integrado basado en STMmicroelectronics, y su hardware y software son de uso libre (Robotis es el software que controla la tarjeta electrónica, puede ser usado en Windows, Mac OSX y Linux para uso conveniente y fácil desarrollo de robots), Figura 3.

Respecto a los aspectos de la programación en Robotis, en la Figura 3 b), la línea:

Dxl.writeWord(ID, Adress, Value) es una función que indica: *ID* – el número del actuador, *Adress* – identifica la posición y *Value* – la posición final. En este ejemplo, la posición cambia de 0 a 130.6 en intervalos de 50 ms (las tres filas de programación en la Figura 3 b), dichos números adimensionales en el programa, se traducen

a un ángulo de torsión alternante de 0° a 1° para este ejemplo. Además, esta máquina de fatiga tiene una pantalla digital que muestra el número de ciclos de fatiga en tiempo real. Ambos, el contador de ciclos y la máquina de fatiga se detienen simultáneamente cuando la probeta fractura.

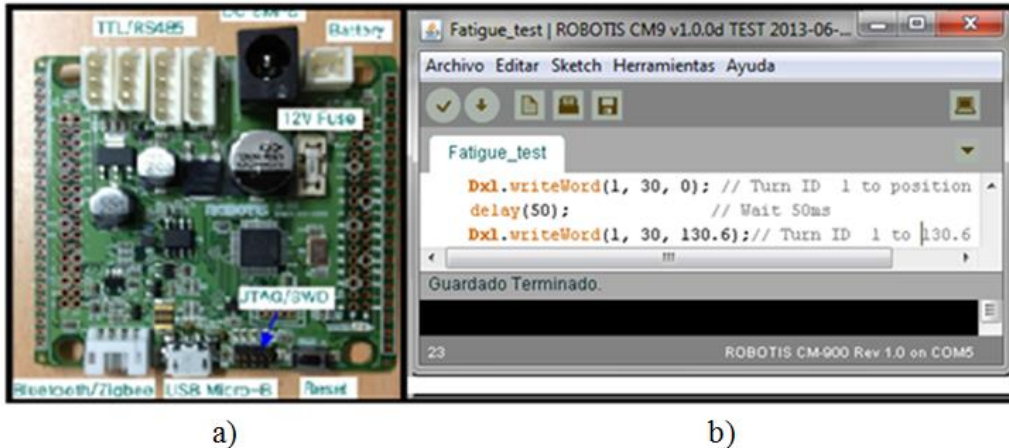


Figura 3. a) Tarjeta CM – 900, b) Software de programación Robotis CM9 v1.0.0d.

El diámetro en la sección estrecha de las probetas a torsión fue cercano a 4.1 mm; no existe una norma internacional disponible para probetas de fatiga por torsión; la norma ASTM A939-97 trata de ensayos de alambres de sección constante bajo torsión. El perfil del espécimen fue determinado para inducir un esfuerzo de trabajo en la sección del cuello de 90, 80, 70 y 60% del esfuerzo

de cedencia por torsión de este material (117 MPa). La Figura 4 a) muestra las dimensiones (mm) y las restricciones de la probeta simétrica con forma de reloj de arena usada en los ensayos de fatiga por torsión, y la Figura 4 b) presenta la probeta fabricada para los ensayos de torsión, partiendo de una barra sólida.

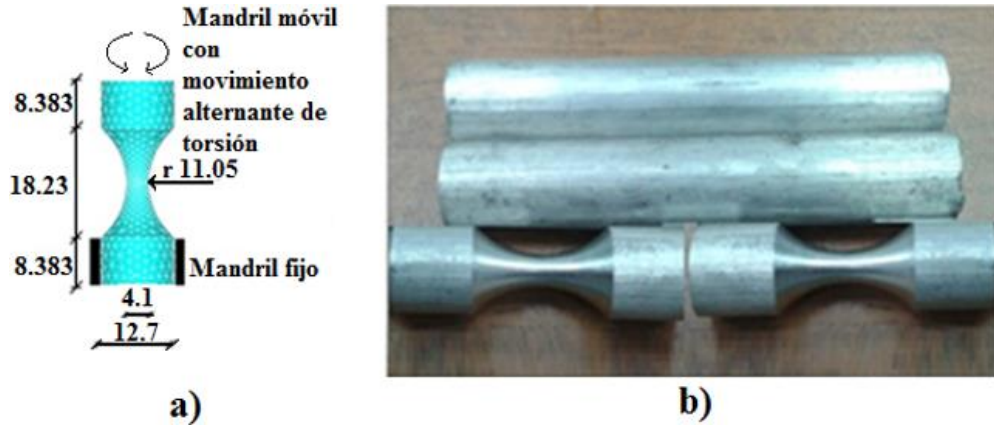


Figura 4. a) Forma, dimensiones (mm), y restricciones de las probetas a torsión, b) barras sólidas y probetas fabricadas.

Se llevó a cabo un análisis por técnicas de elemento finito en el programa Ansys Multiphysics, con las dimensiones de especímenes y condiciones frontera anteriormente señaladas. En dicho análisis se encontró que por debajo del límite de cizalladura, existe una relación lineal entre el ángulo de torsión impuesto a un espécimen y el esfuerzo por torsión inducido en la sección estrecha de la probeta; en el ejemplo de la Figura 5: un grado de torsión induce 44MPa en la zona de cuello de la probeta de fatiga por torsión.

Figura 5. Un grado de torsión induce 44MPa en la sección de cuello de la probeta.

De manera análoga, se llevó a cabo un análisis para determinar el nivel de carga requerido para los ensayos de fatiga por flexión rotativa. La Figura 6 muestra que una carga de 9.81N de flexión, induce un esfuerzo de 44MPa en la sección de cuello en la probeta de la Figura 2 a).

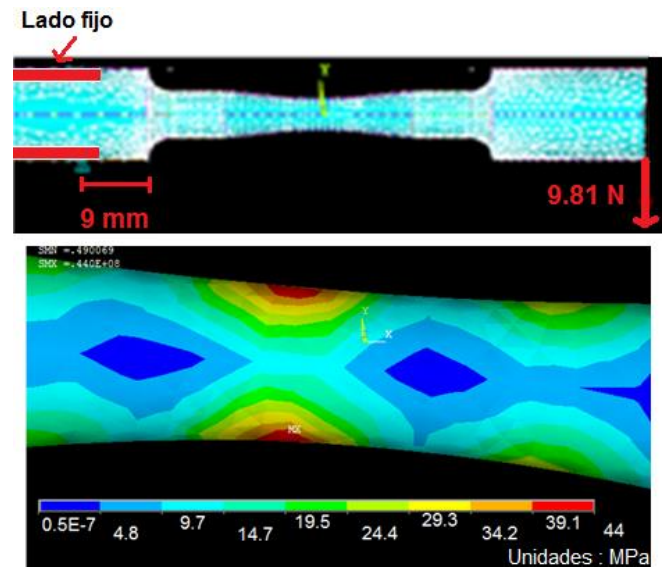
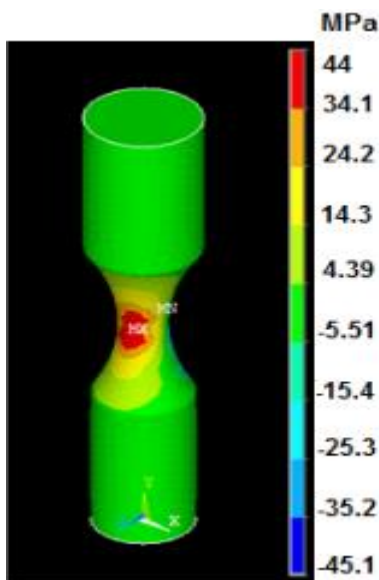


Figura 6. Una carga de 9.81N induce 44MPa en la sección de cuello en una probeta de flexión rotativa.

Con las simulaciones numéricas en probetas de torsión y de flexión rotativa se pusieron en marcha ensayos de fatiga, cuyos resultados se muestran y comparan en la siguiente sección.

3. Resultados

La Figura 7 muestra los resultados experimentales para las dos modalidades de ensayos de fatiga; se observa que la vida en torsión es menor respecto a la vida en fatiga en flexión rotativa para los cuatro niveles de carga aplicados. Las líneas de tendencia logarítmica (roja y azul) no son paralelas;

ellas convergen para la baja carga aplicada y divergen para el alto nivel de carga. Si se reduce el nivel de carga, la diferencia entre las dos modalidades decrece; estos resultados han sido observados por algunos autores [13-15]. Adicionalmente, desde el punto de vista teórico, una carga muy baja debería implicar una vida de fatiga infinita para ambas modalidades de ensayos. Por otro lado, si se incrementa la carga, la diferencia entre el esfuerzo de cizalladura en torsión y el esfuerzo de cedencia en flexión rotativa es el origen de la variación en la resistencia a la fatiga.

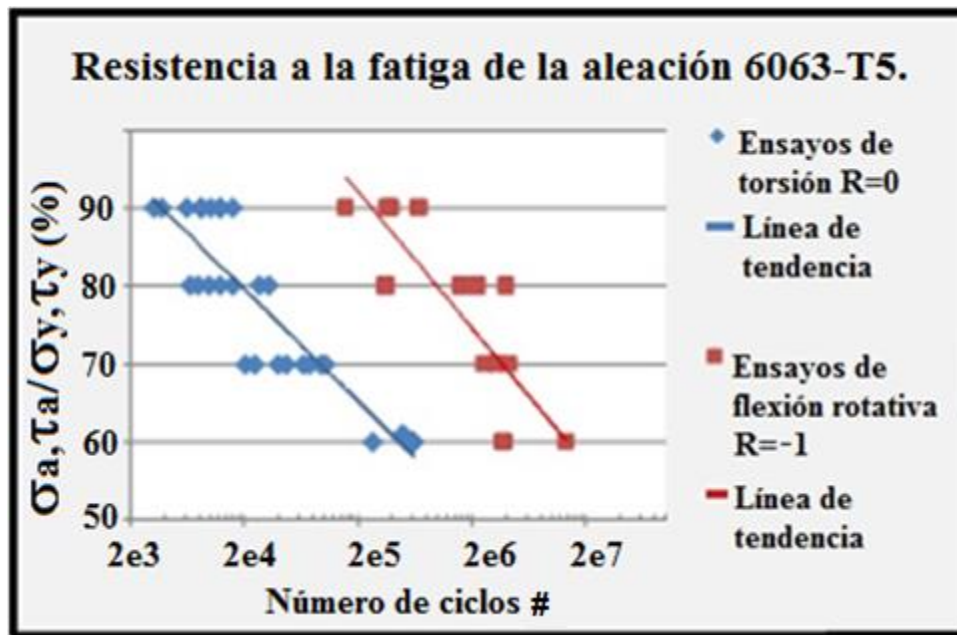


Figura 7. Resistencia a la fatiga de la aleación 6063 – T5, en ensayos de flexión rotativa y torsión.

4. Discusión

La Figura 7 muestra que los resultados de fatiga en flexión rotativa ($R=-1$), en esta aleación de aluminio están cerca de 3×10^5 ciclos al 90% del límite elástico de este material; mientras que al 90% del esfuerzo de cedencia por torsión, la vida en fatiga es cercana a 3000 ciclos ($R=0$), se aprecia una marcada diferencia 100 veces mayor en

resistencia a la fatiga por flexión rotativa frente a la resistencia por torsión. Para el bajo nivel de carga aplicado, la vida en fatiga es cercana a 7 millones de ciclos para el 60% del límite elástico de este material bajo fatiga por flexión rotativa y 3.5×10^5 ciclos bajo fatiga por torsión, con 60% del límite elástico por torsión; de nuevo existe una reducción en la resistencia a la fatiga por

torsión, esta vez 20 veces menor que su equivalente en flexión rotativa. Con los resultados anteriores y con el análisis de las líneas de tendencia de la Figura 7, es posible generalizar que la resistencia a la fatiga por torsión es menor que la de flexión rotativa en esta aleación de aluminio. Para aplicaciones con cargas cercanas al esfuerzo de cedencia y/o al esfuerzo de cizalladura, se tendrá que poner mayor atención en el cálculo y diseño de los componentes sometidos a fatiga por torsión, mientras que en el caso de aplicaciones con cargas inferiores al 60% del esfuerzo de cizalladura y/o cedencia del mismo material, la resistencia a la fatiga por torsión parece converger con la resistencia a la fatiga por flexión rotativa. Mayores

investigaciones por debajo del 50% del esfuerzo de cedencia y del esfuerzo de cizalladura de este material serán llevadas a cabo en un futuro próximo.

Respecto a las superficies de fractura, se observa un camino de grieta principal y uno secundario para los ensayos de flexión rotativa, Figura 8 a), perpendicular al eje principal de la probeta. Bajo fatiga por flexión rotativa de aleaciones de aluminio, es frecuentemente observado un camino principal de grieta y otro camino de grieta secundario y simultaneo, los cuales compiten entre sí para generar la fractura final [16-17].

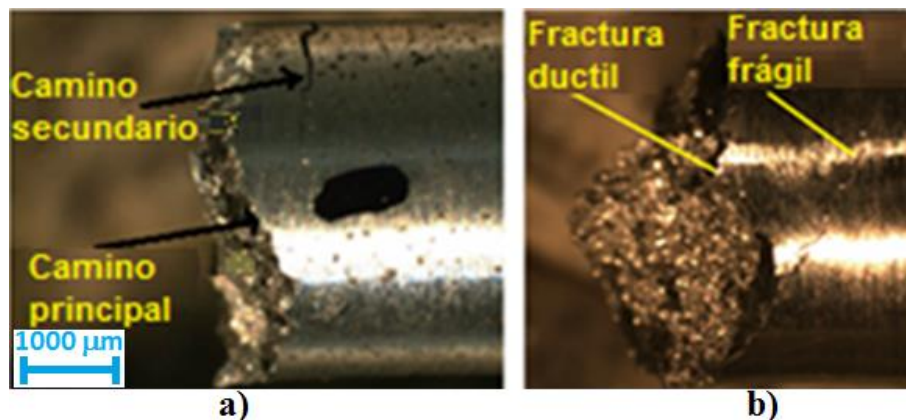


Figura 8. a) Caminos de grieta para flexión rotativa, y b) caminos de grieta por torsión.

Camino de grietas de ensayos de fatiga por torsión son mostrados en la Figura 8 b). Un comportamiento dúctil de agrietamiento es presente en este material el cual es perpendicular al eje principal. Además, se observa un agrietamiento angular de tipo frágil que se desarrolla simultáneamente a un ángulo cercano a 45° respecto del eje principal de la probeta.

El último resultado revela el comportamiento de la aparición y propagación de la grieta en un material

intermedio entre dúctil-frágil, como lo es esta aleación de aluminio, bajo condiciones de fatiga por torsión [18-19]. La propagación de la grieta de manera perpendicular al eje principal está relacionada a un comportamiento dúctil bajo cargas de fatiga por torsión, lo cual ha sido estudiado por otro autor [20]; mientras que la propagación de la grieta con un ángulo cercano a 45° está asociada con un comportamiento frágil bajo cargas de fatiga por torsión [21].

Superficies de fractura obtenidas por

microscopía electrónica de barrido para los ensayos de fatiga por torsión se muestran en la Figura 9 a), y una importante deformación plástica caracteriza la zona cercana a la superficie de la probeta, Figura 9 b). Los

resultados están en concordancia con el alto gradiente de esfuerzo bajo cargas por torsión: alto esfuerzo en la superficie de la probeta y linealmente decrece en dirección radial hacia el centro de la probeta.

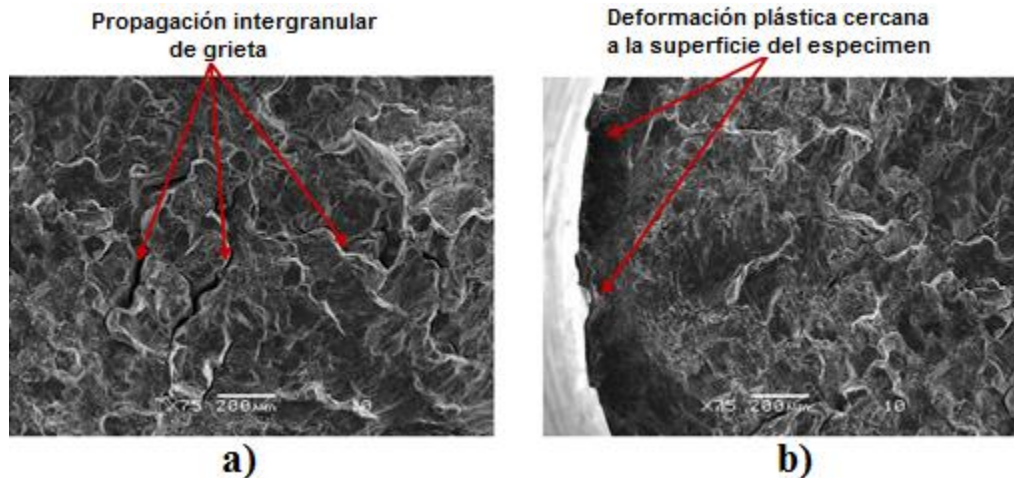


Figura 9. a) Propagación intergranular de grieta al centro del espécimen bajo cargas de torsión, b) alta deformación plástica en la sección angosta del espécimen.

5. Conclusión

Ensayos de fatiga por flexión rotativa han sido comparados con ensayos de fatiga por torsión para la aleación de aluminio 6063 – T5. Para el alto régimen de carga (90% del límite elástico y por torsión de este material), la resistencia a la fatiga por flexión rotativa ($R = -1$) es cien veces más grande comparada con la resistencia a la fatiga por torsión ($R = 0$). De acuerdo al bajo régimen de carga (60% del límite elástico y a torsión de este material), la resistencia a la fatiga por flexión rotativa es solamente 20 veces la correspondiente a los ensayos de torsión. Una máquina de ensayos de fatiga por torsión ha sido diseñada y desarrollada para llevar a cabo los ensayos de fatiga por torsión.

Se observan caminos de propagación de grieta primario y secundario bajo flexión rotativa, mientras que un comportamiento

dúctil-frágil en la propagación de grieta es observado en las probetas de fatiga por torsión. Las superficies de fractura por torsión presentan una propagación de grieta intergranular en el centro de la probeta, donde el nivel de esfuerzos es bajo comparado a la superficie del espécimen. Una importante deformación plástica es observada en la superficie del espécimen (sección estrecha), donde el esfuerzo por torsión es alto.

Mayores investigaciones serán llevadas a cabo en un futuro próximo, particularmente en la transición del comportamiento dúctil-frágil de la propagación de grieta, la variación de la resistencia a la fatiga entre flexión rotativa y torsión en esta aleación de aluminio bajo la misma relación de cambio, e investigaciones concernientes a los efectos de los límites elástico y de torsión en la aparición y propagación de grietas en esta

aleación de aluminio.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su gratitud a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por las facilidades recibidas durante este estudio. Una mención especial de gratitud al CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología en México), por el soporte financiero destinado a este trabajo por el programa de beca: CB-241117-2014.

ORCID

Gonzalo M. Domínguez Almaraz
<http://orcid.org/0000-0002-8786-8640>

References

- [1] Mazzolani FM Structural applications of aluminium in civil engineering Structural Engineering International. 2006: 16(4); 280-285.
- [2] Pan R Tian TM Jin IM M Ma D Failure Analysis of Aircraft Aluminum Alloy Structures in Coastal Environments Advanced Materials Research. 2012: 430-432; 1509-1513.
- [3] Sasaki K, Takahashi T. Low cycle thermal fatigue and microstructural change of AC2B-T6 aluminum alloy. Int. J. of Fatigue. 2006: 28(3); 203-210.
- [4] Kciuk M, Tkaczyk S. Structure, mechanical properties and corrosion resistance of AlMg5 and AlMg1Si1 alloys I of Achiev in Materials and Manufact. Engineering. 2007: 21(1); 39-42.
- [5] Ghali E. Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys (Understanding, Performance and Testing) Hoboken New Jersey, John Wiley & Sons; 2010, 640 pages.
- [6] *Aluminum Alloys Materials Management Inc. 23 December 2015. Retrieved 2016-07-
<http://www.thealuminumsource.com/tech/alloys.htm>*
- [7] Zhu X, Shyam A, Jones IW, Mayer H, Iasecki IV and Allison IE (2006). Effects of microstructure and temperature on fatigue behavior of E319-T7 cast aluminum alloy in very long life cycles. Int. J. of Fatigue. 2006: 28(11); 1566-1571.
- [8] Kermanidis AT, Petroviannis PV and Pantelakis SG. Fatigue and damage tolerance behavior of corroded 2024-T351 aircraft aluminum alloy. Theor and Appl Fract. Mechanics. 2005: 43(1); 121-132.
- [9] Li RH, Zhang P and Zhang ZF. Fatigue cracking and fracture behaviors of coarse-grained copper under cyclic tension-compression and torsion loadings. Mat. Scien. and Eng.: A. 2013: 574; 113-122.
- [10] Akiniwa Y, Stanzl-Tschech S, Mayer H, Wakita M and Tanaka (2008). Fatigue strength of spring steel under axial and torsional loading in the very high cycle regime. Int. J. of Fatigue. 2008: 30(12); 2057-2063.
- [11] Ávila Ambriz II, Domínguez Almaraz GM, Correa Gómez F and González Bernal R. Fatigue Testing Machine Under Different Modes Including Rotating Bending, Torsion and Its Combinations. J. of Mechatronics. 2014: 2(4); 246-250.
- [12] Domínguez Almaraz GM, Avila Ambriz II, and Cadenas Calderón F. Fatigue endurance and crack propagation under rotating bending fatigue tests on aluminum alloy AISI 6063-T5 with controlled corrosion attack. Eng Fracture Mechanics. 2012: 93; 119-131.
- [13] Mayer H, Schuller R, Karr U, Irrasch D, Fitzka M, Hahn M, Bacher-Höchst M. Cyclic torsion very high cycle fatigue of VDSiCr spring steel at different load ratios. Int. J. of Fatigue. 2015: 70; 322-327.
- [14] Zhang J, Xiao Q, Shi X, Fei B. Effect of mean shear stress on torsion fatigue failure behavior of 2A12-T4 aluminum alloy. Int. J. of Fatigue. 2014: 67; 173-182.
- [15] Mayer H. Ultrasonic torsion and tension-compression fatigue testing: Measuring principles and investigations on 2024-T351 aluminium alloy. Int. J. of Fatigue. 2006: 28; 1446-1455.
- [16] Takahashi Y, Yoshitake H, Nakamichi R, Wada T, Takuma M, Shikama T, Noguchi H. Fatigue limit investigation of 6061-T6 aluminum alloy in giga-

- cycle regime. *Materials Science and Engineering: A*. 2014; 614; 243–249.
- [17] Couteri H, Bellett D, Morel F, Agustins L, Adriën J. High cycle fatigue damage mechanisms in cast aluminium subject to complex loads. *Int. J. of Fatigue*. 2013; 47; 44-57.
- [18] Liu S, Chao YJ, Zhu X. Tensile-shear transition in mixed mode I/III fracture. *Int. J. of Solids and Structures*. 2004; 41; 6147-6172.
- [19] Campbell FC. *Fatigue and Fracture: Understanding the Basis*. Materials Park OH 44073-0002, ASM International 2012, 685 pages.
- [20] Billington EW. Failure on ductile materials deformed in simple torsion. *Eng. Fract. Mechanics* 1981; 15(1-2); 21-37
- [21] McClafin D, Fatemi A. Torsional deformation and fatigue of hardened steel including mean stress and stress gradient effects. *Int. J. of Fatigue* 2004; 26; 773-784.