



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLAS DE HIDALGO**

**DIVISION DE POSGRADO DE LA  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**

**DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA  
RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXION  
ROTATIVA DEL ACERO AISI-SAE 1018,  
CERCA DEL LIMITE ELASTICO**

**TESIS**

PARA OBTENER EL TITULO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA MECANICA**

PRESENTA:

***ING. MAURICIO GUZMAN TAPIA***

ASESOR:

***DR. GONZALO M. DOMINGUEZ ALMARAZ***

**MORELIA, MICHOACAN, FEBRERO 2009**



**DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA  
RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXION  
ROTATIVA DEL ACERO AISI-SAE 1018,  
CERCA DEL LIMITE ELASTICO**

## INDICE

• Agradecimientos	5
• Relación de figuras	6
• Relación de tablas	8
• Abstract	9
• Introducción	10
• Antecedentes	11
a) Fallas por fatiga	11
b) Avances prácticos alcanzados para el estudio de fatiga	17
• Justificación	18
c) Fallas por fatiga	18
d) Acero AISI-SAE 1018	18
e) Flexión rotativa	18
• Objetivo general	20
• Objetivos específicos	20
• Hipótesis	21

## CAPITULO 1 TEORIA ALUSIVA

1.1 Fatiga	22
1.2 Fallas mecánicas	22
1.3 Tipos de fallas mecánicas	23
1.4 Aspectos macroscópicos de fatiga en metales	26
1.5 Superficies de la fractura por falla y características microscópicas	27

## **CAPITULO 2 INFRAESTRUCTURA**

2.1	Microdurómetro	33
2.2	Torno de control numérico	35
2.3	Microscopio electrónico Jeol jsm-5900	36
2.4	Maquina de ensayos de fatiga en flexión rotativa de alta frecuencia	36
2.5	Descripción de la máquina de ensayos de fatiga en flexión rotativa de alta frecuencia	38
2.5.1	Sistema mecánico	38
2.5.2	Sistema electrónico- digital	39
2.5.3	Sistema eléctrico-magnético	40
2.5.4	Sistema de carga	41

## **CAPITULO 3 MATERIAL DE ENSAYOS**

3.1	Acero AISI SAE 1018	43
3.2	Dimensiones de las probetas	43
3.3	Simulación numérica	45
3.3.1	Efecto de la velocidad de giro	46
3.3.2	Efecto del radio de estrechez	48
3.3.3	Efecto de la carga aplicada	49

## **CAPITULO 4 RESULTADOS EXPERIMENTALES**

4.1 Condiciones de los ensayos	51
4.2 Resultados de los ensayos	53
4.3 Discusión de resultados	59

## **CAPITULO 5 ANALISIS ESTADISTICO**

5.1 Análisis estadístico	62
--------------------------	----

## **CAPITULO 6 PREDICCIÓN DE VIDA EN FATIGA**

6.1 Predicción de vida en fatiga	67
----------------------------------	----

<b>CONCLUSIONES</b>	72
---------------------	----

<b>BIBLIOGRAFIA</b>	74
---------------------	----

## AGREDECIMIENTOS

A la **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**, que es cuna de grandes Nicolaítas.

A la **Facultad de Ingeniería Mecánica** por el apoyo recibido durante mi formación profesional.

Al consejo estatal de ciencia y tecnología (**COECYT**) por la ayuda para tramites de titulación.

## RELACION DE FIGURAS

Figura 1. Superficie característica de una fractura por fatiga.	27
Figura 2. Superficies típicas de la fractura por fatiga en piezas roscadas.	28
Figura 3. Microdurómetro con monitor integrado. (Mitutoyo).	33
Figura 4. Torno de Control Numérico Computarizado (DYNA MYTE 3300).	35
Figura 5. Microscopio electrónico Jeol JSM-5900.	36
Figura 6. Maquina de ensayos de Fatiga en flexión rotativa.	37
Figura 7. Sistema mecánico.	38
Figura 8. Sistema electrónico-digital.	39
Figura 9. Sistema eléctrico-magnético.	40
Figura 10. Sistema de carga en el extremo de la probeta.	41
Figura 11. Dispositivo de ensayos de fatiga en flexión rotativa.	42
Figura 12. Dimensiones y perfil de la probeta.	44
Figura 13. Simulación de las probetas en VISUAL NASTRAN.	45
Figura 14. Efecto de la velocidad de giro.	46
Figura 15. Evolución de los esfuerzos inerciales.	47
Figura 16. Variación del esfuerzo máximo en la probeta.	48
Figura 17. Variación de la carga P y del diámetro de la zona estrecha	50
Figura 18. Maquinado de las probetas.	51
Figura 19. Rugosidad en la sección estrecha de la probeta.	52

Figura 20. Superficie de fractura de la probeta No 7.	54
Figura 21. Resultados de la resistencia a la fatiga.	55
Figura 22. Rango de la vida en fatiga.	56
Figura 23. Inicio de falla de la probeta No.1.	56
Figura 24. Análisis por difracción de rayos X.	57
Figura 25. Impurezas en la superficie de fractura.	58
Figura 26. Superficies de fractura de todas las probetas.	61
Figura 27. Histograma de datos.	63
Figura 28. Histograma de datos de la muestra censurada.	66
Figura 29. Estimación de los factores $P_z$ e $I_F$ .	68
Figura 30. Resultados experimentales y resultados del modelo empírico.	70

## RELACION DE TABLAS

Tabla I. Pruebas de dureza del acero AISI SAE 1018.	33
Tabla II. Propiedades mecánicas del acero AISI SAE 1018 del fabricante.	34
Tabla III. Composición Química y Propiedades Mecánicas del acero AISI-SAE1018.	43
Tabla IV. Variación del diámetro de la zona estrecha respecto a la carga P.	49
Tabla V. Resultados experimentales.	53
Tabla VI. Datos obtenidos y ordenados de la muestra.	62
Tabla VII. Evaluación de los datos ordenados.	65
Tabla VIII. Evaluación del parámetro $S_D$ .	69
Tabla IX. Vida en fatiga experimental y calculada.	70

## ABSTRACT

### EXPERIMENTAL STUDY OF ROTATING BENDING FATIGUE ON AISI SAE 1018 STEEL, CLOSE TO ELASTIC LIMIT.

AISI-SAE 1018 low carbon steel is a versatile welding and well hardening material involved in many industrial applications: suitable for parts requiring cold forming, such as crimping, bending, or swaging. Especially suitable for carburized parts requiring soft core and high surface hardness, such as gears, pinions, worms gears, kingpins, ratchets. This metallic alloy with an important number of impurities (non metallic inclusions) was chosen to carry out the tests. A new machine to perform rotating bending fatigue tests of high frequency was developed in the Faculty of Mechanical Engineering, University of Michoacán (UMSNH), Mexico, the first world rotating bending fatigue machine working at 150 Hz. The principal components of this machine are: electrical motor that provides motion to rotating axis which is connected to specimen; electronic system destined to count the number of cycles, it is composed by an electronic sensor, electronic card, personal computer and software. The applying load system consists of a bearing at the free side of specimen allowing communicating the applied load  $P$ , a spring frame supporting the bearing and a load cell with a screen displaying the applied load. A proximity sensor stops the electrical motor when the specimen is failing. The numerical simulations were carried out with the aid of Visual Nastran software in order to determine the theoretical stress distribution inside the specimen. Therefore, this information was used for the experimental set up. Test conditions were: room temperature with no control of environment humidity and surface polish. However, machining process for all specimens was as homogeneous as possible in order to avoid roughness effect.

## INTRODUCCION

En las industrias modernas relacionadas con la Ingeniería Mecánica, como: la industria aeronáutica, la automotriz, trenes a gran velocidad, generación y distribución de electricidad, industria petrolera, aparatos eléctricos y electrónicos, entre otras, han mejorado su eficiencia gracias al desarrollo de nuevos materiales y a la mejoras de sus propiedades físicas y mecánicas[1,2,3,4]; además, frecuentemente sus elementos o sistemas están sometidos a cargas mecánicas oscilantes de alta frecuencia, alcanzando el régimen de alto número de ciclos.

Es de particular importancia, entonces, reproducir experimentalmente las condiciones de estos elementos para conocer la resistencia en fatiga en flexión rotativa, en vista de limitar los riesgos de falla y de aumentar la vida útil de los mismos. Por lo anterior, muchas empresas industriales de clase mundial están dedicando esfuerzos y recursos a la investigación y el desarrollo de nuevos productos para mejorar su la vida útil y resistencia de sus elementos.

La tendencia mundial actual en materia de diseño mecánico observando el criterio de resistencia mecánica, se ha orientado fuertemente a conocer la resistencia a la fatiga de los materiales en el régimen a gran número de ciclos (fatiga gigacíclica) [5], y en condiciones de agresión corrosiva; este es el caso para el diseño de turbinas de avión, turbinas de vapor, motores de combustión interna, plataformas marinas, motores eléctricos, entre otros.

## ANTECEDENTES

### a) Fallas por fatiga

El primer gran impacto de las fallas debido a los esfuerzos repetidos fue en la industria ferroviaria: se puso en evidencia que las vías fallaban regularmente y se recomendó la eliminación de esquinas agudas para evitar la concentración de esfuerzos residuales [6] (es el estado de esfuerzos existente en el volumen del material en ausencia de una carga externa incluyendo la gravedad u otra fuente de esfuerzos).

La palabra "fatiga" fue introducida entre 1840 y el 1850 para describir las fallas que ocurrían por esfuerzos repetidos. Esta palabra continuo siendo utilizada para la descripción normal de la fractura debido a los trabajos llevados a cabo en Alemania durante las décadas de 1850 y 1860 por August Whöler. Este pionero en el estudio de la fatiga mecánica realizó muchas pruebas en el laboratorio bajo esfuerzos repetidos. Dichos experimentos fueron orientados a las fallas de las vías férreas y se consideran ser la primera investigación sistemática de la fatiga. Así, Whöler es llamado el "padre" de la prueba sistemática de fatiga. Usando los diagramas del esfuerzo contra el número de ciclos (S-N), él demostró que la vida en fatiga de algunos materiales disminuye cuando se incrementaba la amplitud de carga mecánica aplicada, por debajo de cierta amplitud de esfuerzo que podría considerarse éste último el inicio de la deformación plástica o permanente. Estos trabajos dieron origen al concepto del diagrama de esfuerzo-número de ciclos (S-N), y del límite de la fatiga. También precisó que el espectro de la carga mecánica aplicada juega un papel principal para definir la resistencia a la fatiga de los materiales [7]. Entre las décadas de 1870 y 1890, se adicionaron investigaciones ampliando y verificando el trabajo clásico de Whöler. Gerber, y otros investigadores estudiaron la influencia del esfuerzo medio. Goodman propuso una teoría simplificada esfuerzo medio, su nombre todavía se asocian a los diagramas relacionados con el

esfuerzo medio y alternativo. Bauchinger [8] en 1886, demostró que el esfuerzo de cedencia en tensión o compresión fue disminuido después de aplicar una carga de signo opuesto causando una deformación inelástica. Esta era la primera constatación que con un solo cambio de signo sobre la tensión inelástica, podría cambiar la deformación - tensión en el comportamiento de los metales.

A principios de 1900, Erwing y Humfrey [9] utilizaron el microscopio óptico para investigar los mecanismos de fatiga. Las líneas y bandas de deslizamiento podrían conducir a la formación de microfisuras. Basquin [10] en 1910 demostró que la tensión alternada contra el número de ciclos de la fatiga (S-N) en la región finita de vida, podría ser representada como una relación lineal en la escala logarítmica. Sus ecuaciones, más algunas modificaciones hechas por otros investigadores, se utilizan actualmente para representar el comportamiento de la vida en fatiga. En la década de 1920, Gough y asociados contribuyeron en gran parte a la comprensión del mecanismo de fatiga. También demostraron los efectos combinados de la flexión y de la torsión (fatiga multiaxial). Gough publicó el libro "Comprensión de la Fatiga de Metales" en 1927 [11]. Moore y Kommers [12] publicaron el primer libro Americano de "Comprensión de la Fatiga de Metales" en 1927. En 1920 Griffith [13] publicó los resultados de sus cálculos y experimentos teóricos en fractura frágil, usando materiales quebradizos. Encontró que la resistencia a la fractura del cristal dependía del tamaño de las grietas microscópicas. Con este primer trabajo sobre la importancia de las fisuras microscópicas. Griffith desarrolló la base para la Mecánica de la Fractura, convirtiéndose así en el "padre" de la Mecánica de la Fractura. Entre 1929 y 1930 Haigh [14], presentó una explicación racional de la respuesta del acero de alta resistencia y del acero suave bajo condiciones de fatiga, cuando las muescas están presentes. Utilizó los conceptos del análisis de la tensión de la muesca y de los esfuerzos residuales, que fueron desarrollados más adelante por otros. Durante la década de 1930, un gran avance práctico fue alcanzado por la introducción del "shot-peening" (endurecimiento por impacto o granallado en la industria de automóvil).

Las fallas por fatiga de los resortes y de los árboles de levas, que habían sido comunes, después llegaron a ser raros. Almen [15] explicó correctamente las mejoras espectaculares por los esfuerzos residuales compresivos, producidos en las capas superficiales de las piezas martilladas, y promovió el uso del martilleo y de los procesos que producen tensiones residuales beneficiosas. Horger [16] demostró que el balanceo superficial podría prevenir el crecimiento de grietas. En 1937, Neuber [17] introdujo efectos del gradiente de la tensión en las muescas y el concepto elemental del bloque, esto indica que la tensión media sobre un volumen pequeño en la raíz de la muesca es más importante que la tensión máxima en la muesca. Gassner [18], en 1939, acentuó la importancia de la prueba de amplitud variable y promovió el uso de un espectro de carga de 8 etapas para la simulación. La prueba del bloque era prominente hasta que la prueba de circuito cerrado del sistema electrohidráulico llegó a estar disponible a finales de los 50's y principios de los 60's.

Durante la Segunda Guerra Mundial el uso deliberado de esfuerzos residuales compresivos llegó a ser común en el diseño de los motores de avión y de vehículos armados. Muchas fracturas frágiles en tanques soldados y barcos soldados con soldadura autógena motivan la reflexión sobre las discontinuidades preexistentes o defectos en forma de fisuras y la influencia de la concentración de esfuerzos. Muchas de estas fracturas frágiles comenzaron en esquinas cuadradas de las escotillas, en cortes cuadrados y en soldaduras. Las soluciones incluyeron el redondeo de las esquinas, mas el remachado para detener la grieta y poner mayor énfasis en las propiedades de los materiales. En 1945, Miner [19] formuló un criterio del daños de la fatiga sugerido por Palmgren [20] en 1924. Este criterio acerca de los daños de fatiga se conoce como "la Ley Palmgren-Miner". Se ha utilizado extensamente en el diseño de fatiga y, a pesar de sus defectos, sigue siendo una herramienta importante en predicciones de la vida de fatiga. La formación del comité E-09 de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) en 1946, con Peterson como su presidente, organizó un foro para los estándares de prueba de fatiga e

investigación. Peterson acentuó que el factor de la muesca en fatiga era una función del factor de la concentración de esfuerzos [21]. En 1953, publicó un libro comprensivo de factores de concentración de esfuerzos [22] y una versión amplia [23] en 1974.

El “cometa”, primer avión de pasajeros a reacción, comenzó a funcionar en mayo de 1953 después de 300 horas de vuelo. Cuatro días después en una inspección, en enero de 1954, se estrelló en el mar mediterráneo. Después de mucho tiempo los restos habían sido recuperados, la investigación y las pruebas exhaustivas de los componentes del cometa habían sido hechas, concluyendo que el accidente fue causado por falla de fatiga en la cabina presurizada. Las pequeñas grietas por fatiga originaron la abertura del fuselaje en una esquina. Otros dos jets fallaron catastróficamente. El Cometa había sido probado a fondo. La presión exterior de la cabina en grandes alturas era de 57 Kpa (8.25 psi). En septiembre de 1953, una prueba de la cabina había sido presurizada 18,000 veces a 57 kpa además de 30 ciclos anteriores entre 70 y 110 kpa. El diseño de esfuerzo para 57 kpa era de 40 por ciento de la fuerza de tensión de la aleación de aluminio. Todo jet de este tipo fue puesto fuera de servicio, y la atención fue centrada en diseño en la fatiga de la armadura de avión.

Las contribuciones importantes al tema de fatiga en los años 50s incluyeron la introducción de la prueba del sistema servo hidráulico en circuito cerrado, que permitió una mejor simulación de historia en la carga de especímenes, componentes, y los sistemas mecánicos. El microscopio electrónico abrió nuevos horizontes para una mejor comprensión del mecanismo básico de fatiga. Irwin [24] introdujo el factor de la intensidad de esfuerzos, que ha sido aceptado como la base de los mecanismos elásticos lineales de fractura y de las predicciones de la vida del crecimiento de la grieta. También creó el término “Mecánica de la Fractura”, y debido a sus importantes contribuciones al tema en este tiempo, se considera el “padre moderno” de la Mecánica de la Fractura. La distribución de Weibull [25] proporcionó dos o tres parámetros para la distribución estadística de la prueba y el análisis de probabilidad de la vida de la fatiga.

La formación del Comité de Prueba de Fractura de Aceros de Alta Resistencia del ASTM a principios de los 60's, fue el punto de partida para la formación del Comité E-24 de ASTM sobre fractura en 1964. Este comité ha contribuido significativamente en el campo de mecanismos de fractura y en el crecimiento de grieta por fatiga, y fue combinado con el comité E-09 de ASTM en 1993 para formar al comité E-08 sobre fatiga y fractura. Paris [26] a principios de la década de 1960, estimó que el crecimiento de grieta por fatiga  $da/dN$  podría describirse de la mejor manera usando la gama  $\Delta K_I$  del factor de la intensidad de esfuerzos. A finales de los años 60s los catastróficos desplomes del avión F-111 fueron atribuidos a la fractura frágil de los miembros que contenían defectos de fabricación. Estas fallas, así como problemas de fatiga en otros aviones de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, fueron la base para utilizar los conceptos de la Mecánica de la Fractura en el desarrollo del programa bombardero B-1 de los años 70s. Estos programas incluían las consideraciones de vida del crecimiento de grieta en fatiga basadas en el tamaño inicial de la grieta. Schijve [27] a principios de los años 60's, enfatizó que el crecimiento variable de grieta por fatiga en el avión que usaban para pruebas, así como la importancia de las cargas externas en la presencia de grietas, pueden causar el retraso significativo del crecimiento de grieta en fatiga. En 1967 el Puente Silver, en Point Pleasant, en el oeste de Virginia, se derrumbó sin advertencia. Las investigaciones extensas del derrumbe demostraron que una fractura en la hendidura de la abrazadera causada por el crecimiento de un defecto hasta un tamaño crítico, fue la causa [28]. El defecto inicial era debido a la fatiga, una grieta causada por corrosión. Esa falla ha tenido una influencia profunda en los requisitos subsecuentes del diseño establecidos por la Asociación Americana de Estados, Transportes y Autopistas AASHTO (American Association of State and Highway and Transportation Officials).

En 1970, Elber [29] demostró la importancia del cierre de la grieta durante el crecimiento en la fatiga. Desarrolló un modelo cuantitativo-demostrativo en el cual el crecimiento de grieta en la fatiga fue controlado por un rango efectivo del factor de intensidad de

esfuerzos, en contraposición al rango aplicado del factor de la intensidad de esfuerzos. El modelo del cierre de la grieta se utiliza comúnmente en cálculos actuales del crecimiento de grieta de la fatiga. En 1970, París demostró [30,31] que el umbral de crecimiento de fisura podría ser obtenido para cuando el crecimiento de grieta por fatiga no ocurre. Durante los años 70s, una dependencia internacional y un esfuerzo cooperativo, formularon varios espectros estándares de la carga para los aviones, estructuras construidas en mar adentro, y el uso de carros. Estos espectros estándares [32,33] han sido utilizados por muchos ingenieros en una gran variedad de usos. En julio de 1974, la Fuerza Aérea de los Estados Unidos publicaron el estándar llamado Mil A-834444, que define los requisitos de la tolerancia de las fallas para el diseño del nuevo avión militar. El uso de la Mecánica de la Fractura como herramienta para la fatiga fue establecida a través de la necesidad de mejorar cuantitativamente, la capacidad no destructiva de la inspección como parte integral del requisito de la tolerancia de fallas.

Durante los años 80s y 90s, muchos investigadores trabajaron en el complejo problema de la fatiga multiaxial en fase y desfasada. El método plano crítico sugerido por Brown y Miller [34] motivó a una nueva filosofía referente a este problema, y muchos modelos planos críticos adicionales fueron desarrollados. El pequeño problema de la grieta fue observado durante este tiempo y muchos científicos trataron de entender el comportamiento. El pequeño problema de la grieta era complejo e importante, puesto que estas grietas crecieron más rápidamente que las grandes grietas basadas sobre la misma fuerza impulsora. Las definiciones llegaron a ser muy confusas. El interés en la fatiga de los materiales electrónicos, se incrementaron junto con las investigaciones en la fatiga termomecánica. Los materiales compuestos, basados en polímeros, el metal y cerámica eran desarrollados para diversas industrias. Los logros y usos más grandes implicaron matrices compuestas de polímeros y de metales. Estos progresos fueron motivados por la industria aeroespacial pero también por otras industrias. Durante este tiempo, muchos diseños costosos y complejos de un gran número de componentes de

aviones que usaban conceptos de diseño de vidas-segura, eran retirados rutinariamente con un potencial uso seguro. En 1988 un accidente casi fatal del avión Aloha Boeing 737, después de más de 90,000 horas de vuelo, creó la enorme preocupación por daños en “múltiples sitios” y se mejoró el mantenimiento y la inspección no destructiva.

La corrosión acompañada de fatiga y la inspección inadecuada eran grandes contribuidores al problema de daños del fenómeno “múltiples sitios” que existió en diversos tipos de aviones. Las investigaciones fueron emprendidas para entender mejor el problema y para determinar cómo se puede hacer frente a éste, y resolverlo.

b) Avances prácticos alcanzados para el estudio de fatiga

Durante la década de 1930 un gran avance práctico fue alcanzado por la introducción del “endurecimiento por impacto o granallado” (shot-peening) en la industria de automóvil. Las contribuciones importantes al tema de fatiga en los años 50s incluyeron la introducción de la prueba del sistema servo hidráulico en circuito cerrado, que permitió una mejor simulación de historia en la carga de especímenes, componentes, y todos los sistemas mecánicos. Muchos accidentes, varios de ellos fatales ocurrieron debido a fallas por fatiga.

El microscopio electrónico abrió nuevos horizontes para una mejor comprensión del mecanismo básico de fatiga. También durante los años 80s y 90s, cambios significativos en muchos aspectos del diseño de fatiga fueron atribuidos a los avances en la informática. Esto incluye el software para diversos modelos y avances de la vida en fatiga (durabilidad), en la habilidad para la simulación en condiciones reales, cargas bajo amplitud variables, estructuras complejas.

## JUSTIFICACION

### c) Fallas por fatiga

La pertinencia de este proyecto se sustenta, entre otros factores, en los costos económicos que implican las fallas mecánicas, principalmente fallas por fatiga-fractura.

Un estudio realizado en los Estados Unidos hace algunos años reveló que las pérdidas por fatiga-fractura ascendieron a los 119 mil millones de dólares que era casi el 4% del Producto Interno Bruto en ese año [35]. Las fallas por fatiga implican varios áreas de la ingeniería como: puentes para los ingenieros civiles, tractores para los ingenieros agrónomos, válvulas del corazón en el caso de un ingeniero biomédico y una tubería nuclear para ingenieros nucleares, entre otros.

### d) Acero AISI-SAE 1018

Entre los aceros de bajo carbón, el acero AISI-SAE 1018 es el más versátil por sus propiedades mecánicas, que, en comparación con otros aceros del mismo tipo, son mejores debido a su alto contenido de manganeso, buena soldabilidad y maquinabilidad.

Sus aplicaciones son especiales para partes donde se requiera un interior suave y una superficie dura (muy sensibles a los tratamientos térmicos) como: engranes, piñones, tornillos sin fin, pernos, retenes, etc.

### e) Flexión rotativa

En la industria moderna, muchos elementos trabajan a altas velocidades en condiciones de rotación. Si, como en muchos casos, se presenta una carga en uno de sus extremos entonces se configura la condición de flexión con rotación o flexión rotativa. Además, el ciclo a la flexión casi siempre duplica o triplica los de tracción-compresión en el trabajo de

un elemento o equipo determinado. Adicionalmente, debido a la facilidad y bajo costo en la puesta en marcha de los ensayos en flexión rotativa y los argumentos anteriores, se optó por esta modalidad de ensayos experimentales en el presente trabajo. A lo anterior se suma que generalmente al determinar las tensiones en los elementos, los valores que resultan de efectos de flexión, superan a los de tracción-compresión. En casi todos los casos, las tensiones normales que se obtienen son resultado de aplicar teorías de resistencia (Teoría de Von Mises) y por tanto son términos equivalentes o resultantes en las tensiones normales, también por estas razones se prefiere estudiar la flexión ante la tracción-compresión.

## **OBJETIVO GENERAL**

Obtener resultados experimentales sobre la resistencia a la fatiga en flexión rotativa a alta frecuencia (150 Hz), aplicando cargas que provoquen esfuerzos cercanos al límite elástico del acero AISI-SAE 1018, y utilizando para ello parámetros geométricos para la probeta de pruebas cercanos a los utilizados por laboratorios en Japón [36, 37, 38].

## **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- a) Estudiar el estado actual del conocimiento en lo relacionado con las pruebas mecánicas de los materiales, y en específico la resistencia a la fatiga en flexión rotativa del acero AISI-SAE 1018 en condiciones de carga provocando esfuerzos cercanos al límite elástico,
- b) Calibrar el dispositivo de ensayos de fatiga en flexión rotativa de alta frecuencia para utilizarlo en el ensayo del acero AISI-SAE 1018,
- c) Realizar los ensayos de resistencia a la fatiga en flexión rotativa del acero AISI-SAE 1018,
- d) Analizar resultados y establecer algunos criterios de falla,
- e) Obtener algunos resultados para comenzar a constituir un banco de datos técnicos relacionados con la resistencia a la fatiga.

## **HIPOTESIS**

Ensayando el acero AISI- SAE 1018, es posible determinar su resistencia a la fatiga en flexión rotativa con cargas cercanas al límite elástico y de establecer algunos criterios de falla a partir de la correlación entre las superficies de fractura y parámetros observados en estas superficies.

## CAPITULO 1 TEORIA ALUSIVA

### 1.1 Fatiga

El tema de la fatiga es aplicable a una amplia variedad de estructuras y de máquinas incluyendo: automóviles, naves espaciales, puentes, tractores, implantes biológicos y los recipientes nucleares a presión, entre otros. Esta capítulo inicia con la descripción de los tres principales métodos de análisis en fatiga mecánica, que se enlistan a continuación:

- 1.- Esfuerzo – número de ciclos (S-N), (Whöler
- 2.- Deformación – número de ciclos ( $\epsilon$ -N ), (Coffin.Manson)
- 3.- Crecimiento de fisura ( $da/dN$ -  $\Delta K$ ), (Paul C. Paris)
  - a) Por formación de pequeñas grietas
  - b) Crecimiento de la grieta hasta fractura.

### 1.2 Fallas mecánicas

Las fallas mecánicas han causado muchos daños y muchas pérdidas financieras. Sin embargo, en cuanto al exitoso diseño de un gran número de componentes y estructuras mecánicas, las fallas mecánicas son mínimas. Las fallas mecánicas implican una extrema interacción del tiempo de carga y el medio ambiente que incluye temperatura y corrosión. La carga aplicada puede ser: constante, variable, axial y/o multiaxial. La duración de la carga puede extenderse desde años hasta siglos como los puentes de acero o de segundos a milisegundos como el accionar una pistola. Las temperaturas pueden variar de criogénica con los combustibles para un cohete espacial, hasta la temperatura de una silla de casa, o incluso arriba de 1000°C para una turbina de gas, pueden ser isotérmicas o

variables. Los ambientes corrosivos pueden extenderse desde un ataque severo al motor de un automóvil con agua salada, ningún ataque o hasta uno con gas inerte. La interacción de la carga, tiempo y medio ambiente junto con la selección de los materiales, geometría, proceso y esfuerzos residuales crea una amplia gama de la complejidad y de los posibles tipos de falla en todos los campos de la ingeniería. El exceso de deformación o deformación plástica, es probablemente el tipo de falla más común estudiada en el pasado, aunque razonablemente superado en el presente. En la industria moderna actual, las cargas mecánicas que no exceden el límite elástico de los materiales y que varían con el tiempo, conducen con frecuencia a la condición de falla por fatiga.

### 1.3 Tipos de fallas mecánicas

- 1.- Exceso de deformación.
- 2.- Fractura dúctil.
- 3.- Fractura frágil.
- 4.- Impacto o carga dinámica.
- 5.- Termofluencia.
- 6.- Relajación.
- 7.- Choque térmico.
- 8.- Desgaste.
- 9.- Inestabilidad mecánica.
- 10.- Corrosión, fragilidad asociada al hidrógeno, irradiación de neutrones (éstos no son tipos de fallas mecánicas, pero interactúan con aspectos mecánicos).

11.- Fractura por esfuerzo-corrosión.

12.- Aspectos estéticos (éstos no son tipos de fallas mecánicas, pero interactúan con aspectos mecánicos).

13.- Fatiga.

- a) Fatiga por formación de la grieta.
- b) Fatiga por crecimiento de la grieta.
- c) Amplitud de carga constante o variable.
- d) Carga axial o multiaxial.
- e) Fatiga por corrosión.
- f) Fatiga mecánica con frotamiento.
- g) Fatiga por termofluencia.
  - 1.-Isotérmico.
  - 2.-Termomecánico.
- h) Falla por la combinación de los tipos de falla mecánica del a) al g).

La falla por exceso de deformación puede también ser elástica y puede ocurrir en una maquina rotativa. La fractura frágil contiene macro o micro plasticidad, e implica la poca absorción de energía y la rapidez del crecimiento de grieta durante fractura. La fractura dúctil implica gran nivel de plasticidad y se asocia a una importante absorción de energía, con la fractura asociada principalmente al reagrupamiento de microporos que se forman en las inmediaciones de inclusiones y/o partículas de segunda fase. La incisión transcrystalina y la fractura intercrystalina son los micromecanismos más comunes de la fractura frágil en metales. Muchas fracturas frágiles de las naves enviadas para la segunda guerra mundial fueron atribuidas a la interacción en regiones soldadas con

concentraciones de esfuerzos, esfuerzos residuales, estados de esfuerzos multiaxiales y baja resistencia a la dureza en las fracturas. El impacto o las condiciones de cargas dinámicas que crean gran tensión en metales, tienden a bajar la dureza y ductilidad. Un ejemplo de un impacto de fractura controlado implica la rampa usada en las catapultas de los portaaviones para el lanzamiento de un avión. La termofluencia y la relajación de metales son comunes en temperaturas elevadas. Termofluencia puede causar deformación permanente y/o fracturas y es generalmente intercrystalina. La Fatiga por termofluencia han ocurrido en los alabes del motor de una turbina de gas debido a las fuerzas centrífugas. Estos han sido superados usando monocristales en los alabes. La relajación es la responsable de las pérdidas de esfuerzos residuales y pérdidas de carga externa que pueden ocurrir en temperaturas elevadas o en temperatura ambiente. El choque térmico tiende a promover la grieta y/o fractura frágil. La fractura por desgaste, ocurre en todas las temperaturas e incluye diferentes formas y comportamientos del crecimiento de grieta. La fatiga por inestabilidad mecánica (Buckling failure) puede ser inducida por carga externa o condiciones térmicas y puede implicar inestabilidades elásticas o plásticas. La corrosión por sí misma implica el desgaste del material y la formación de grietas. El crecimiento de las grietas puede ocurrir debido a la interacción del esfuerzo aplicado y/o residual y el ambiente corrosivo. Esta interacción se llama fractura por esfuerzo de corrosión o formación de la grieta por el medio ambiente. Los ejemplos de fractura por esfuerzo de corrosión ocurren en muchos componentes de cobre tales como accesorios de la plomería y en casquillos de municiones. Estas fallas ocurren incluso sin el uso debido de esfuerzos residuales y la interacción corrosiva del medio ambiente. La fragilidad asociada al hidrogeno es la más susceptible en aceros de alta resistencia y causa grietas intercrystalinas que pueden conducir a la fractura frágil. Este tipo de fractura ha ocurrido en tornillos de grado 8 (SAE) usados en automóviles. Al menos la mitad de todas las fallas mecánicas es debido a la fatiga, incluyen artículos simples diarios tales como resortes de las puertas, cepillos de dientes, raquetas del tenis, bulbos de la luz

eléctrica y flexión repetida de los clips para el papel. También incluyen componentes más complejos y estructuras que implican los vehículos, las naves espaciales, aviones, y los implantes del cuerpo humano. Algunos ejemplos son: son el volante de un automóvil, bielas del motor, ejes del propulsor de las naves espaciales, fuselaje presurizado de aviones, trenes de aterrizaje, prótesis de cadera, etc.

#### 1.4 Aspectos macroscópicos de fatiga en metales

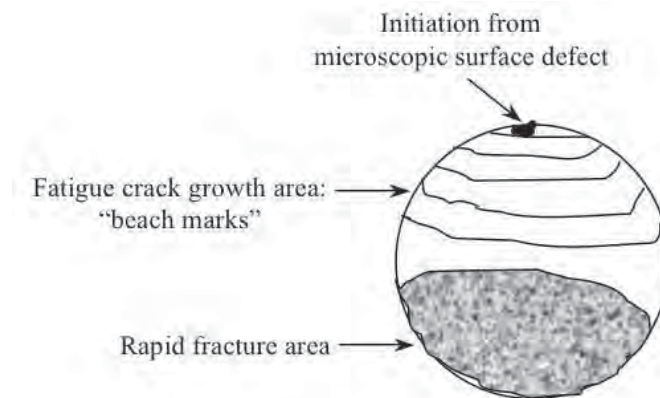
Para uso común, la palabra "fatiga" se refiere al comportamiento de materiales bajo acciones de esfuerzos o deformaciones repetidas, sean monótonas o estáticas. En seis palabras claves se ha puesto énfasis para su definición. La palabra "progresivo" implica que el proceso de fatiga ocurre durante tiempo o uso. Una falla por fatiga es a menudo muy repentina, sin la advertencia previa; sin embargo, los mecanismos implicados pudieron haber funcionado desde el principio del uso del componente o de la estructura. La palabra "localizada" implica que el proceso de la fatiga funciona en áreas locales mejor que a través del componente o de la estructura entera. Estas áreas pueden tener grandes esfuerzos y deformaciones debido a la transferencia externa de carga, a los abruptos cambios en geometría, a las diferencias de temperatura, a los esfuerzos residuales y a las imperfecciones de los materiales. La palabra "permanente" implica que una vez que haya un cambio estructural debido a la fatiga, el proceso es irreversible.

La palabra "fluctuación" implica que el proceso de la fatiga abarca los esfuerzos y deformaciones que son cíclicas en naturaleza y requiere más que una carga sostenida. Sin embargo, la magnitud y la amplitud de los esfuerzos y deformaciones fluctuantes deben exceder ciertos límites de los materiales para que el proceso de la fatiga llegue a ser crítico. A propósito de fatiga, la palabra "fisura" es a menudo la que es mal entendida y empleada. La última causa de todas las fallas por fatiga, es que una fisura haya crecido a

un punto en el cual el material restante no puede ser más tolerante de esfuerzos o deformaciones y puede ocurrir la fractura repentina. La fisura tuvo este tamaño debido a la carga cíclica. La vida en fatiga de las piezas críticas de seguridad, se basan solamente en el crecimiento de la fisura. La palabra "fractura" indica que las etapas pasadas del proceso de fatiga, es la separación de un componente o estructura en dos o más porciones.

### 1.5 Superficies de la fractura por falla y características microscópicas

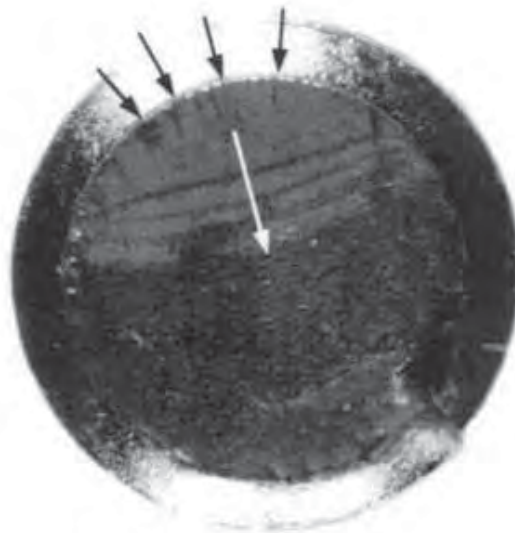
Antes de observar los aspectos microscópicos del proceso de fatiga, examinaremos algunas superficies macroscópicas representativas de la fractura por fatiga. Muchas de estas superficies de fractura tienen características comunes y la frase "falla típica por fatiga" se encuentra a menudo en la literatura y en la práctica. Sin embargo, hay también muchas fallas por fatiga "anormales".



*Figura 1. Superficie característica de una fractura por fatiga.*



a)



b)

*Figura 2. Superficies típicas de la fractura por fatiga en piezas roscadas. (a) Soporte de columna, (b) Tornillo en el poste del asiento de una bicicleta de montaña.*

La figura 2a muestra una superficie típica de falla por fatiga de 97.5 mm (3.84 in), provocado por esfuerzos torsionales [39]. El hilo de la rosca no fue terminado de redondear en las raíces debido a un pobre maquinado, aumentando así la concentración de esfuerzos en esta región, y conduciendo a la falla por fatiga. La superficie de la fractura parece tener dos regiones distintas. La región pequeña y clara del área gruesa en la parte superior de la superficie de la fractura es la sección transversal restante al momento de fracturarse la pieza. La otra área seccionada en la superficie de fractura consiste en la región de la fisura o fisuras del inicio por fatiga. Muchas fisuras iniciales se pueden ver cerca del perímetro izquierdo bajo; éstas son resaltadas por las líneas radiales, a menudo llamadas "marcas de trinquete", extendiéndose alrededor del perímetro izquierdo bajo. Esta es la región donde comenzó el proceso de fisuramiento (evidencia de micro-deformación plástica). Mientras que el componente fue sujeto a esfuerzos cíclicos adicionales, estas microfisuras iniciales crecieron y se unieron de tal forma que, una fractura por fisura creció cerca del 80 por ciento de la superficie. Las bandas onduladas oscuras y claras son evidentes en la región de fisura por fatiga. Estas marcas a menudo se llaman "marcas de playa", y se originan debido a las dos superficies adyacentes abiertas de la fisura, que se abren y se cierran y se juntan en el curso de la aplicación; o también por la aparición, paro o crecimiento de la fisura durante un espectro variable de carga. La interacción de una fisura y el medio ambiente corrosivo bajo carga variable, también tenderá a producir distintas "marcas de playa". La figura 2b muestra una superficie de fractura de un tornillo roscado con diámetro de 8 milímetros (0.3 in). Este tornillo fue utilizado para sujetar el asiento a un poste en una bicicleta de montaña. La condición de carga impuesta en el tornillo era predominante axial pero también incluía un pequeño componente de flexión. En la figura 2b, muchas fisuras iniciales se pueden ver cerca del perímetro superior, según lo indicado por las flechas negras. Sin embargo, el número de estas líneas radiales no es tan grande como en la figura 2a.

Las líneas radiales oscuras acentúan que estas microfisuras iniciales fueron nucleadas y crecieron en alturas leves diversas dentro de la raíz del hilo de rosca. Una vez más, estas microfisuras crecieron y eventualmente se unieron para formar una grande, que creció aproximadamente 40 por ciento de la superficie en la dirección indicada por la flecha blanca. El punto de la flecha blanca identifica el final del crecimiento de la fisura por fatiga y el principio de la fractura final. “Marcas de playa” son nuevamente visibles, y la inspección cercana de la superficie de fractura, las “marcas de playa” oscuras mostraron la ruina de la decoloración y de la corrosión que indicaba una contribución del medio ambiente al crecimiento de la fisura. La región de la fractura final se muestra en la porción más baja de la figura. La región derecha más baja de la fractura final es donde los pedazos del tornillo tuvieron frotamiento o deslizaron uno contra otro cuando el tornillo se fracturó. Este comportamiento causó en cierta medida el aspecto plano, sin rasgos distintivos. En la comparación de las figuras 2a y 2b, se notan diversas características. Por ejemplo, el número de “marcas de playa” observado en cada superficie de la fractura es perceptiblemente diferente. Durante la vida de los dos miembros roscados, las condiciones que tienden a producir “marcas de playa” ocurrieron con más frecuencia para el soporte de columna, que para el perno del asiento de la bicicleta. El perno del asiento estuvo en el servicio por menos de 2 años y experimentó varios cambios (medio ambiente) estacionales. Esto contribuye al número de las “marcas de playa” observadas. El número de los sitios de formación de la grieta, identificado cerca de las líneas radiales a lo largo del perímetro externo de cada miembro roscado, revela algo sobre el proceso de fabricación. El perno del asiento exhibió una superficie relativamente lisa en la raíz del hilo de rosca, mientras que el soporte de columna tenía una superficie maquinada deficientemente. La superficie mal trabajada en el maquinado incluyó más discontinuidades superficiales, que condujeron a un mayor número de nucleación de la grieta a lo largo de la raíz del hilo de la rosca.

Por lo tanto, las condiciones superficiales son un aspecto importante de la fatiga. Quizás la diferencia más obvia entre las dos superficies de fractura son los porcentajes de la sección del área de fractura donde la fisura por fatiga creció antes de fractura final. La diferencia se puede atribuir a los niveles cíclicos de carga impuestos a cada miembro o a la resistencia a la fractura del material usado para cada componente. Si las piezas fracturadas adyacentes fueron puestas juntas (algo que no se debe hacer en las fallas reales, puesto que esto puede obscurecer marcas metalúrgicas y obstaculizar el análisis fractografico apropiado), cabrían muy cuidadosamente juntas e indicarían una muy baja deformación permanente. Debido a esta pequeña deformación visual permanente, las fallas por fatiga de este tipo se llaman "fallas frágiles". Sin embargo, este término debe ser modificado puesto que la deformación plástica substancial ocurre en pequeñas regiones locales cerca de la extremidad de la fisura por fatiga y en los sitios de formación de la fisura. Muchas fallas por fatiga no tienen deformación permanente visual apreciable, pero los mecanismos de formación y crecimiento de la fisura implican regiones locales pequeñas de la deformación plástica. Fallas similares a estas son presentadas en la figura 2, a menudo se llaman "fallas típicas por fatiga" porque exhiben las siguientes características comunes siguientes:

1. Sitio o sitios distintos de formación de la fisura.
2. "Marcas de playa" indicativas de crecimiento de la fisura.
3. Región final distinta de la fractura.

Podemos resumir los aspectos antedichos de las superficies de la fractura por fatiga como sigue:

1. El proceso entero de la fatiga implica la formación y el crecimiento de una fisura o varias fisuras hasta la fractura final.
2. La fisura por fatiga en la fractura puede ser muy pequeña o muy grande, ocupando menos del 1 por ciento de la superficie de la fractura hasta casi el 100 por ciento, dependiendo de la magnitud de los esfuerzos aplicados y de la resistencia a la fractura del material.
3. A menudo la región de la fisura por fatiga puede ser distinguida de la región final de la fractura por las “marcas de playa”, la suavidad, y la corrosión. Sin embargo, hay muchas excepciones.
4. Las fisuras por fatiga generalmente se forman en la superficie donde los esfuerzos son grandes y donde un medio ambiente corrosivo y los cambios en geometría existen.
5. Las fisuras por fatiga microscópicas generalmente se forman y crecen en planos de esfuerzos máximos de corte.
6. Las fisuras por fatiga macroscópicas crecen a menudo en el plano de la deformación extensible máxima.

## CAPITULO 2 INFRAESTRUCTURA

### 2.1 Microdurómetro

Se uso el microdurómetro marca mitutoyo para corroborar la dureza del acero AISI SAE 1018 que el fabricante establece. Las pruebas se realizaron con un tiempo de 15 segundos de penetración y 10 kg de carga.



*Figura 3. Microdurómetro con monitor integrado. (Mitutoyo)*

Tabla I. Pruebas de dureza del acero AISI SAE 1018.

PRUEBAS DE DUREZA DEL ACERO AISI SAE 1018 (MICRODUROMETRO)			
No de pruebas	Muestra 1 HRc	Muestra 2 HRc	Muestra 3 HRc
1	14	13	14
2	14.5	13.5	14
3	13	12.5	12
4	11	14.5	12
5	12	12.5	14
6	13	12	12

Para obtener un valor de dureza, se calcula el promedio de las 3 muestras del acero AISI SAE 1018 del mismo lote con el que se hicieron los maquinados de las probetas.

$$Dureza = \frac{14+14.5+13+11+12+13+13+13.5+12.5+14.5+12.5+12+14+14+12+12+14+12}{18} = 12.97HR_C \approx \mathbf{13HR_C}$$

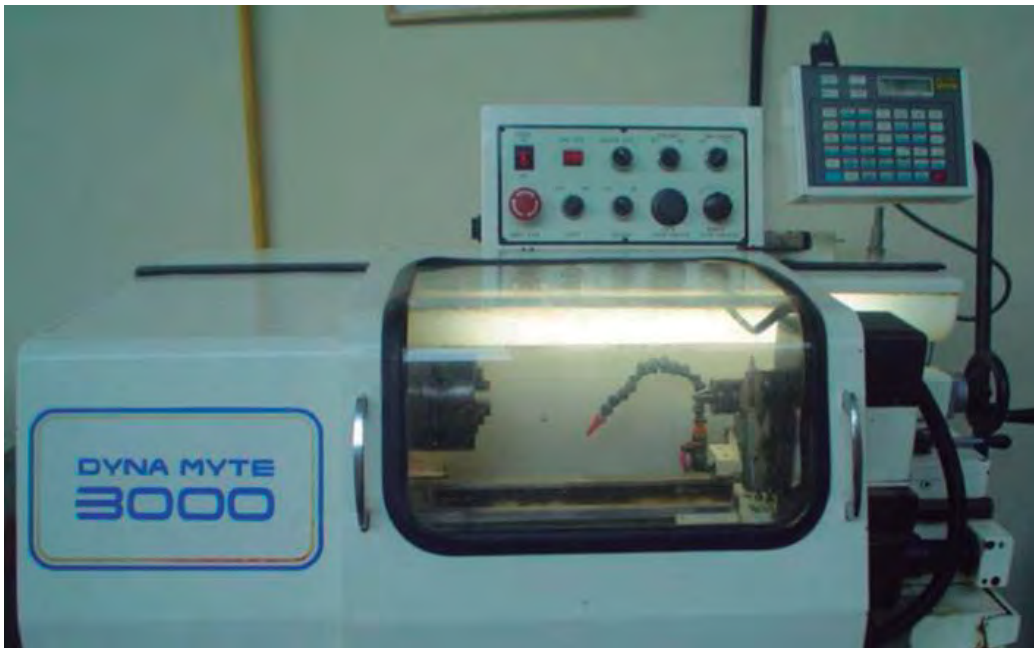
Tabla II. Propiedades mecánicas del acero AISI SAE 1018 del fabricante.

PROPIEDADES MECANICAS DEL ACERO AISI SAE 1018 (FABRICANTE)	
Hardness, Rockwell C	13.0
Tensile Strength (MPa)	634.0
Tensile Strength Yield (MPa)	386.0
Elongation at break (%)	27.0
Modulus of Elasticity (GPa)	200.0
Poissons Ratio	0.290

Como se puede observar en la tabla II, el valor de dureza  $HR_C$  que proporciona el fabricante es prácticamente igual al que se obtuvo en las mediciones de dureza.

## 2.2 Torno de control numérico

El maquinado de las probetas se llevó a cabo en un torno de control numérico computarizado que existe en el laboratorio de “Control Numérico Computarizado” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



*Figura 4. Torno de Control Numérico Computarizado (DYNA MYTE 3000).*

### 2.3 Microscopio electrónico Jeol JSM-5900

Un microscopio electrónico de barrido marca Jeol, modelo JSM-5900, se utilizó para obtener las imágenes de la superficie de fractura, además para llevar a cabo el análisis por difracción de rayos X de los elementos presentes en la superficie de fractura.

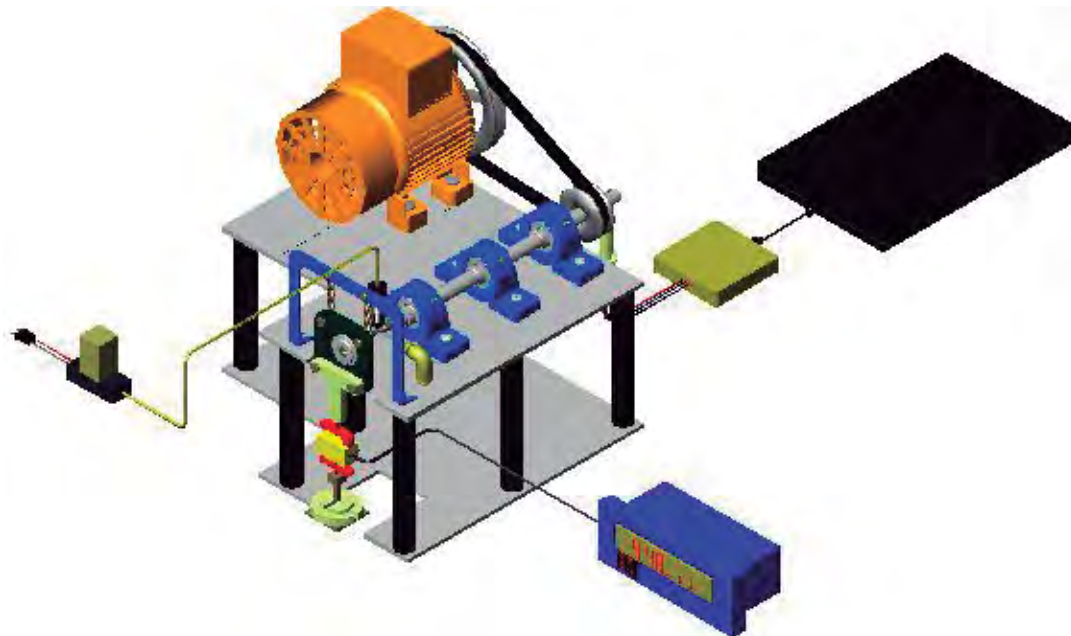


*Figura 5. Microscopio electrónico Jeol JSM-5900.*

### 2.4 Maquina de ensayos de Fatiga en flexión rotativa de alta frecuencia

Una alternativa simple y de bajo costo para investigar la resistencia a la fatiga de aleaciones metálicas, es la máquina de ensayos en fatiga en flexión rotativa de alta frecuencia, 150 Hz. Este prototipo ha sido desarrollado en el Laboratorio de la Facultad de

Ingeniería Mecánica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, bajo la dirección del Dr. Gonzalo M. Domínguez Almaraz, siendo la primera máquina en el mundo que trabaja a la frecuencia de 150Hz. Otras maquinas similares existentes en el mercado internacional trabajan a 50-60hz como velocidad máxima; además, cabe mencionar que el costo total para el desarrollo de este prototipo es del orden del 25% respecto a los prototipos comerciales extranjeros disponibles en el mercado. El prototipo se compone de cuatro sistemas principales: el sistema mecánico, el sistema electrónico- digital para el conteo de ciclos, el sistema eléctrico-magnético para el paro del ensayo experimental y el sistema de carga.

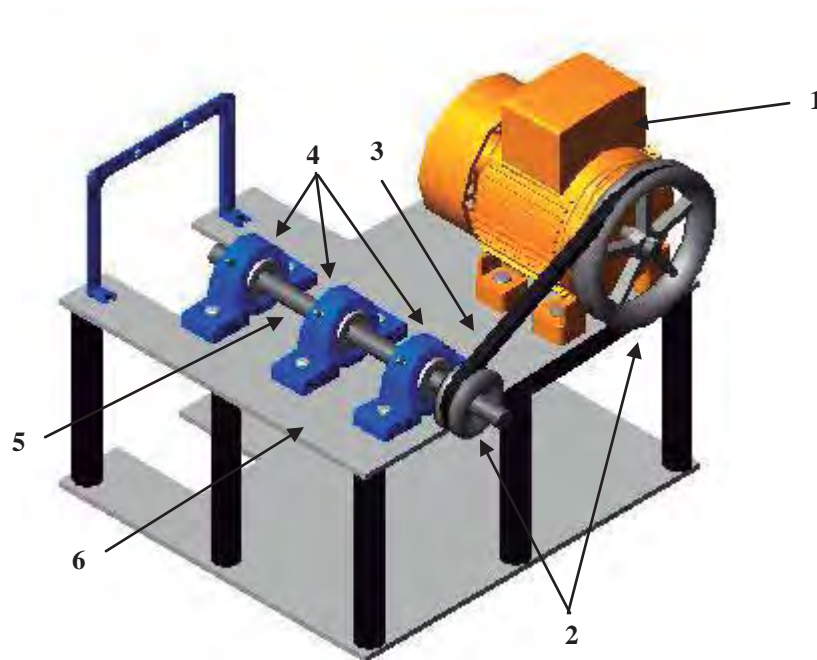


*Figura 6. Maquina de ensayos de Fatiga en flexión rotativa de alta frecuencia*

## 2.5 DESCRIPCION DE LA MAQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA EN FLEXION ROTATIVA DE ALTA FRECUENCIA

### 2.5.1 Sistema Mecánico

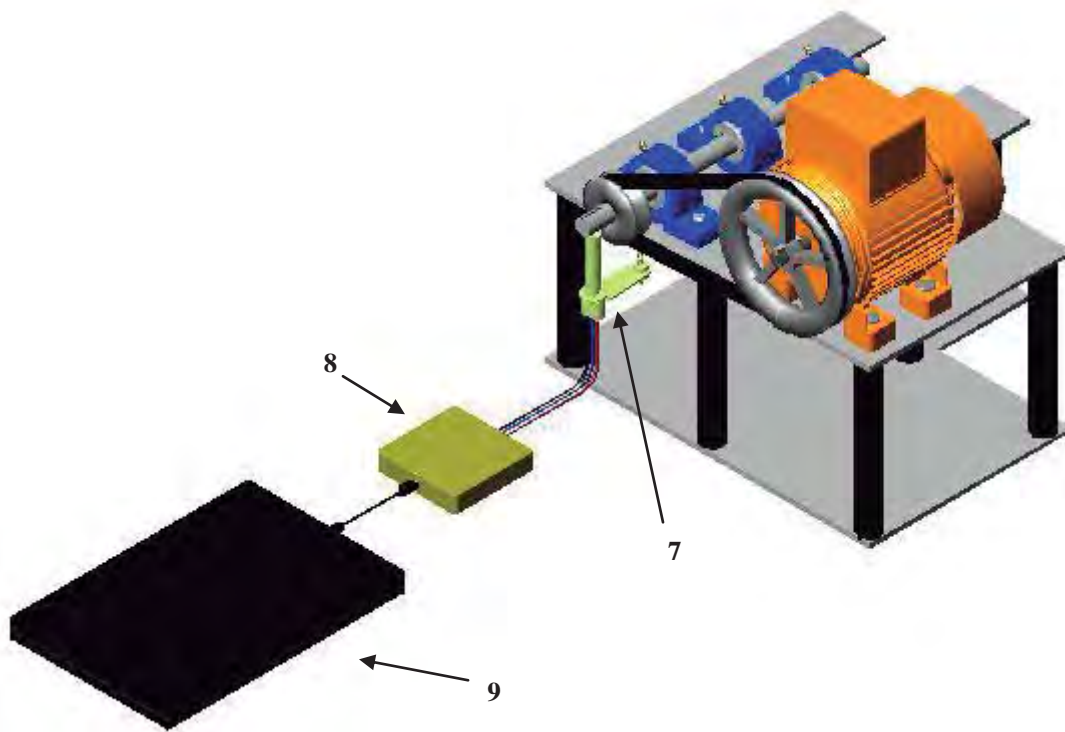
En la figura 7 aparecen los elementos constitutivos del sistema mecánico que son: el motor eléctrico **1** marca siemens, trifásico, 1 HP, tensión 220v, de alta velocidad (3,600 r.p.m.), las poleas de aluminio tipo B de 6" y 2.5" de diámetro **2**, la banda transmisora **3**, las chumaceras **4**, el eje rotativo **5** y las estructuras de soporte para el motor, chumaceras y estructura del sistema de carga en el extremo de la probeta **6**.



*Figura 7. Sistema mecánico de la máquina de ensayos de fatiga en flexión rotativa de alta frecuencia.*

### 2.5.2 Sistema Electrónico- Digital

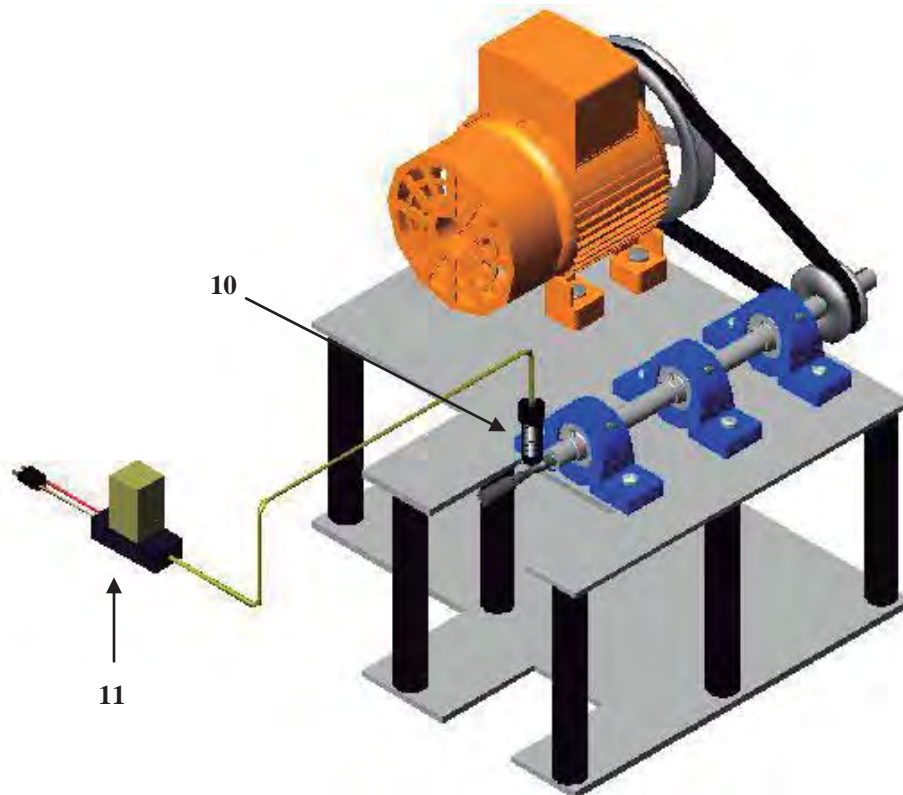
Los elementos constitutivos del sistema electrónico-digital para el conteo de ciclos son: un sensor magnético de variación de voltaje (debido a la variación del campo magnético) **7**, una tarjeta electrónica de adquisición de datos modelo USB-6008 de National Instruments **8**, donde se conecta el sensor magnético en la entrada analógica y la salida digital de esta tarjeta se conecta a la computadora **9** donde previamente se ha instalado el software LabVIEW versión 8.0, para el conteo de ciclos.



*Figura 8. Sistema electrónico-digital para el conteo de número de ciclos.*

### 2.5.3 Sistema Eléctrico-Magnético

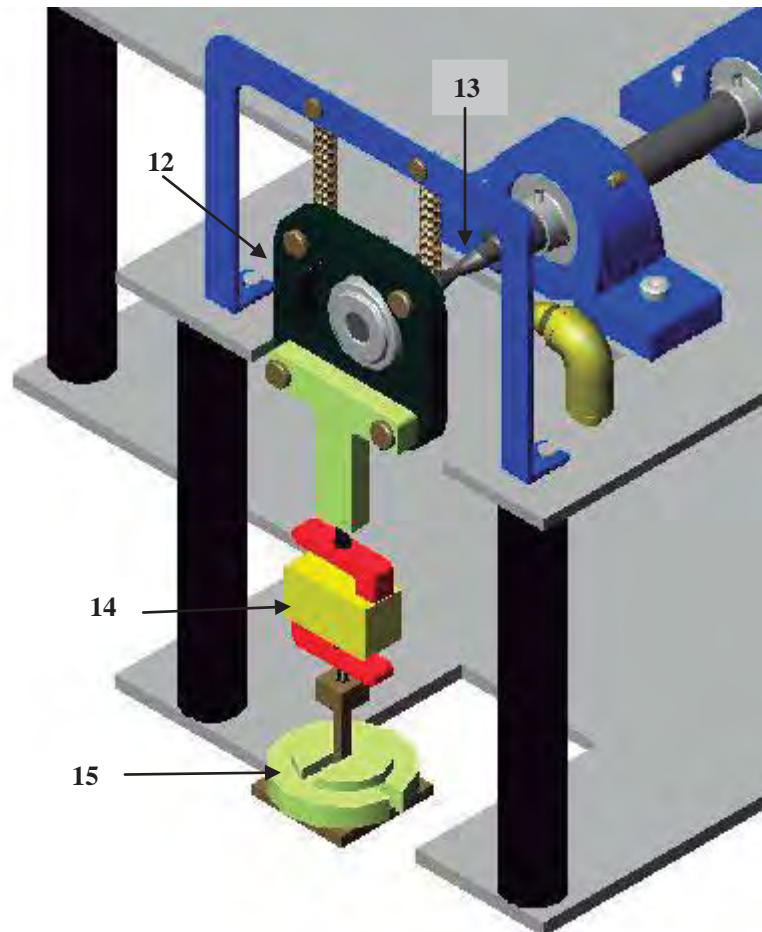
Concerniente al sistema eléctrico-magnético para el paro de los ensayos, su función es de interrumpir la corriente del motor cuando la probeta de pruebas está a punto de ceder por fatiga: fractura y/o deformación plástica. Este sistema consiste en un sensor inductivo **10** basado en la tensión generada en la bobina cuando se somete a una variación de un campo magnético, y en un relevador de corriente **11** que hace las funciones de conector e interruptor entre las salidas del sensor, y el motor eléctrico. Cuando la probeta está a punto de fallar, la distancia entre ésta y el sensor se incrementa interrumpiendo la corriente del sensor, provocando el paro automático del motor eléctrico, así como del ensayo.



*Figura 9. Sistema eléctrico-magnético para el paro del sistema cuando la probeta se fracture.*

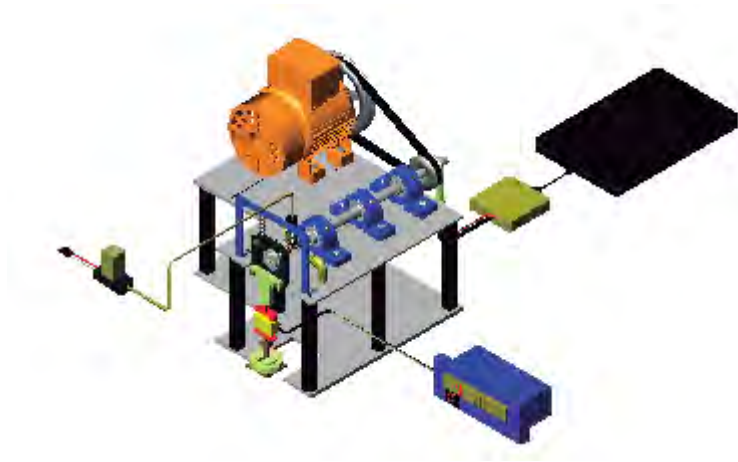
#### 2.5.4 Sistema de Carga

El sistema de carga se conecta a uno de los extremos de la probeta; consiste en una chumacera de pared **12** conectada a la probeta de ensayos **13**, esta chumacera se conecta a una celda de carga **14** que nos indica en un monitor la magnitud de la carga aplicada en cada ensayo, y por último el conjunto de pesas **15** para llegar a la cantidad de peso requerida.

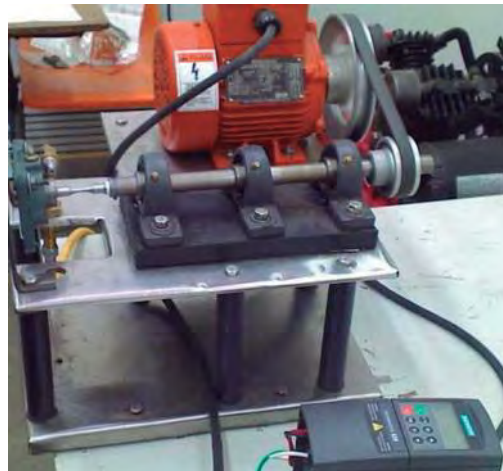


*Figura 10. Sistema de carga en el extremo de la probeta*

La figura 11a muestra los elementos de los sistemas constitutivos de la máquina para ensayos de fatiga en flexión rotativa de alta frecuencia, la figura 11b muestra una imagen real de dicho dispositivo.



a)



b)

*Figura 11.a) Modelo virtual, b) Dispositivo de ensayos de fatiga en flexión rotativa de alta frecuencia.*

## CAPITULO 3 MATERIAL DE ENSAYOS

### 3.1 Acero AISI SAE 1018

El material elegido para hacer el estudio de la resistencia a la fatiga en flexión rotativa es el Acero AISI SAE 1018. Es un acero de bajo carbón con un alto contenido de manganeso, sin tratamiento térmico. La tabla III muestra la composición química y propiedades mecánicas del acero AISI SAE 1018.

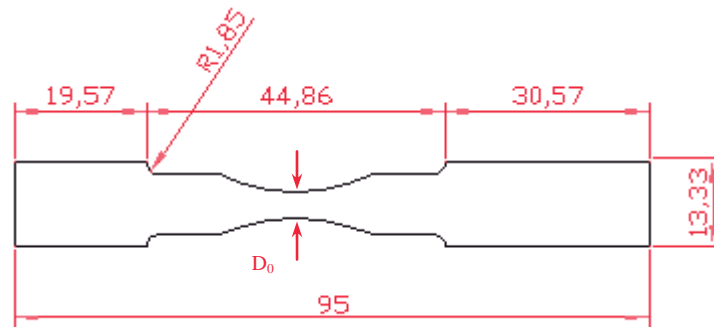
Tabla III. Composición Química y Propiedades Mecánicas del acero AISI-SAE1018.

<u>Composición Química</u>				
Fe	C	Mn	P	S
98.81 - 99.26%	0.14 – 0.20	0.60 – 0.90	max. 0.04	max. 0.05
<u>Propiedades Mecánicas</u>				
UTS	$\sigma_y$	Elongación	Reducción de área	Dureza
(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(HR <sub>C</sub> )
634	386	27	48	13

### 3.2 Dimensiones de las probetas

Debido a que no existen estándares de probetas de fatiga en flexión rotativa a alta frecuencia y debido a las dimensiones de la máquina de ensayos de fatiga en flexión rotativa se utilizaron parámetros de laboratorios japoneses en la zona estrecha de la

probeta. Los extremos son parámetros de la máquina de ensayos de fatiga en flexión rotativa de alta frecuencia.



$D_0 = 4 \text{ mm}$

Dimensiones en cm.



*Figura 12. Dimensiones y perfil de la probeta.*

### 3.3 Simulación numérica

Con el fin de investigar el comportamiento virtual de la probeta sometida a ensayos de fatiga en flexión rotativa según los diferentes parámetros físicos que intervienen, se llevaron a cabo simulaciones con la ayuda del paquete de computación Visual Nastran [40], variando: la velocidad de giro de la probeta, el radio de la zona estrecha de la probeta y la carga aplicada en el extremo.

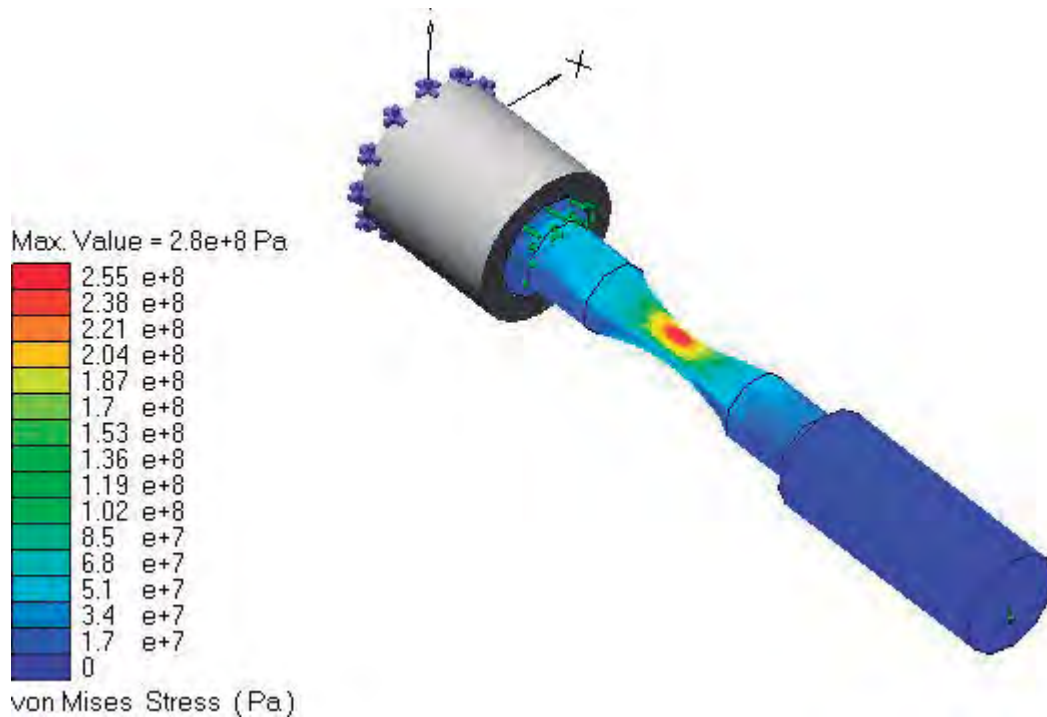


Figura 13. Simulación de las probetas en VISUAL NASTRAN.

### 3.3.1 Efecto de la Velocidad de Giro

En la figura 14 aparecen los resultados de la variación del esfuerzo máximo en la probeta, respecto a la velocidad de giro.

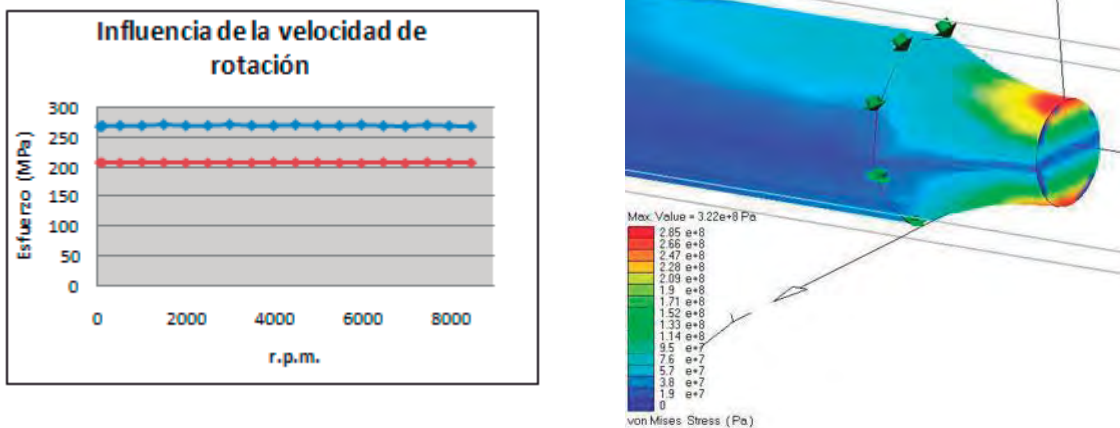


Figura 14. Efecto de la velocidad de giro de la probeta sobre el esfuerzo máximo.

Como puede apreciarse en la figura 14, los esfuerzos máximos obtenidos (valor alto y valor bajo en la simulación numérica) en cada una de las simulaciones se mantuvieron aproximadamente constantes variando la velocidad de giro desde 20 rpm, hasta 8000 rpm (para esta simulación se utilizó  $P = 40 \text{ N}$  para la carga aplicada en el extremo de la probeta, y un diámetro en la zona estrecha de la probeta de  $D_0 = 4 \text{ mm}$ ). En conclusión, la velocidad de giro no tiene influencia sobre la variación del esfuerzo máximo en la probeta en el rango de 20 – 8000 rpm (resultados numéricos). Esto resulta lógico puesto que

haciendo un análisis de los esfuerzos debidos a la fuerza centrífuga en un eje giratorio, tenemos:

$$\sigma_r = \frac{\gamma \omega^2}{8g} (3 + \mu) (b^2 - r^2) \quad (1)$$

$$\sigma_t = \frac{\gamma \omega^2}{8g} (3 + \mu) \left( b^2 - \frac{1 + 3\mu}{3 + \mu} r^2 \right) \quad (2)$$

$\sigma_r$  representa el esfuerzo radial y  $\sigma_t$  el tangencial. Además,  $\gamma$  es la gravedad específica,  $\omega$  la velocidad de rotación,  $\mu$  el coeficiente de Poisson y  $b$  el radio exterior del cilindro. La figura 15 muestra el resultado de los esfuerzos inerciales máximos tomando:  $\gamma = 7800 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 0.28$ , y  $\omega = 10000 \text{ rpm} \approx 1047.2 \text{ rad/seg}$ .

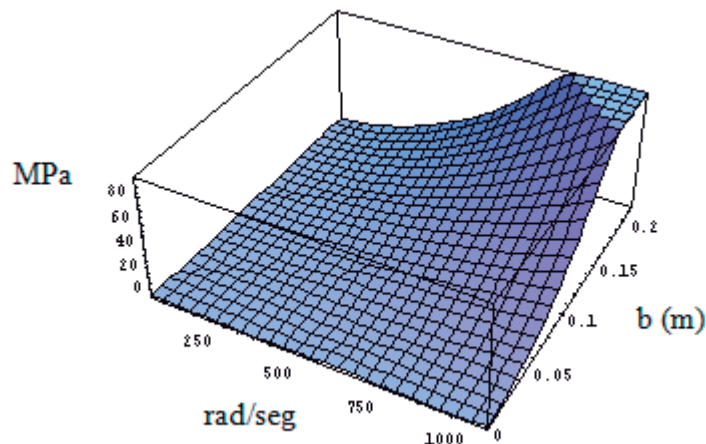
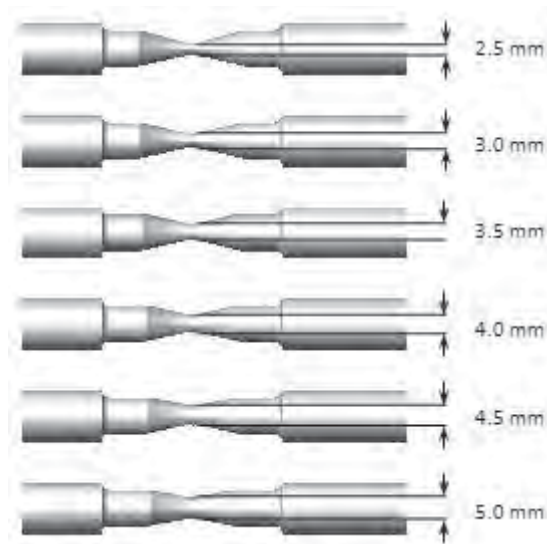


Figura 15. Evolución de los esfuerzos inerciales en función de la velocidad angular ( $\omega$ ) del radio exterior ( $b$ ) de la probeta.

Los esfuerzos inerciales comienzan a ser significativos para valores típicos del acero y una velocidad angular extrema de 1000 rad/seg, cuando el radio exterior de la probeta es superior a 150 mm [40]; nuestra probeta presenta un radio exterior de 2 mm.

### 3.3.2 Efecto del Radio de Estrechez

Respecto a la variación de la zona estrecha en la probeta, la figura 16 muestra los diferentes diámetros en la zona estrecha de la probeta. La tabla IV muestra la carga P necesaria para alcanzar un esfuerzo máximo en la probeta, cercano al esfuerzo de cedencia. Cuando se aumenta el diámetro en la zona estrecha  $D_0$ , la cantidad de carga necesaria para alcanzar el esfuerzo de cedencia debe ser mayor, y si disminuimos el diámetro  $D_0$  debemos disminuir la carga para alcanzar el esfuerzo de cedencia.



*Figura 16. Variación del diámetro en la zona estrecha de la probeta.*

Tabla IV. Variación del diámetro de la zona estrecha respecto a la carga P

<b>Esfuerzos de Von Mises Obtenidos, cercanos al límite elástico del material</b>			
<b>Diámetro D<sub>0</sub> (mm)</b>	<b>Carga P (N)</b>	<b>Esfuerzo simulado σ<sub>s</sub> (MPa)</b>	<b>Esfuerzo de Cedencia σ<sub>y</sub> (MPa)</b>
2.5	10	383	386
3.0	19	374	386
3.5	30	378	386
4.0	44	380	386
4.5	53	375	386
5.0	74	382	386

### 3.3.3 Efecto de la Carga Aplicada

La variación del esfuerzo máximo en la probeta con la carga aplicada P es lineal, como era de esperarse en condiciones de deformación elástica. La figura 17 muestra esta evolución para:  $\omega = 8000$  r.p.m. y  $D_0 = 4$  mm. En la programación de ensayos experimentales, los resultados obtenidos por simulación numérica se han tomado como referencia [40].

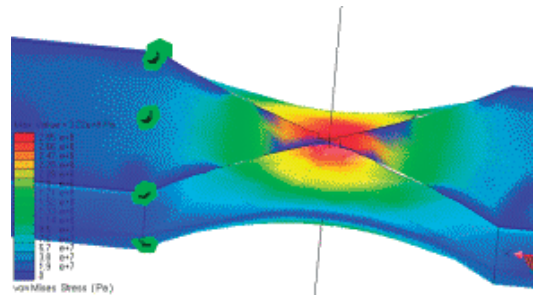
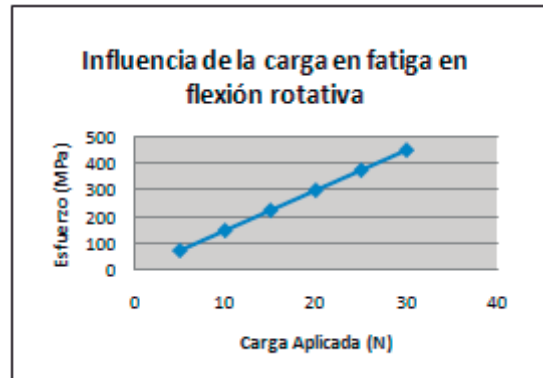


Figura 17. Variación del esfuerzo máximo en la probeta, respecto a la carga aplicada.

## CAPITULO 4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

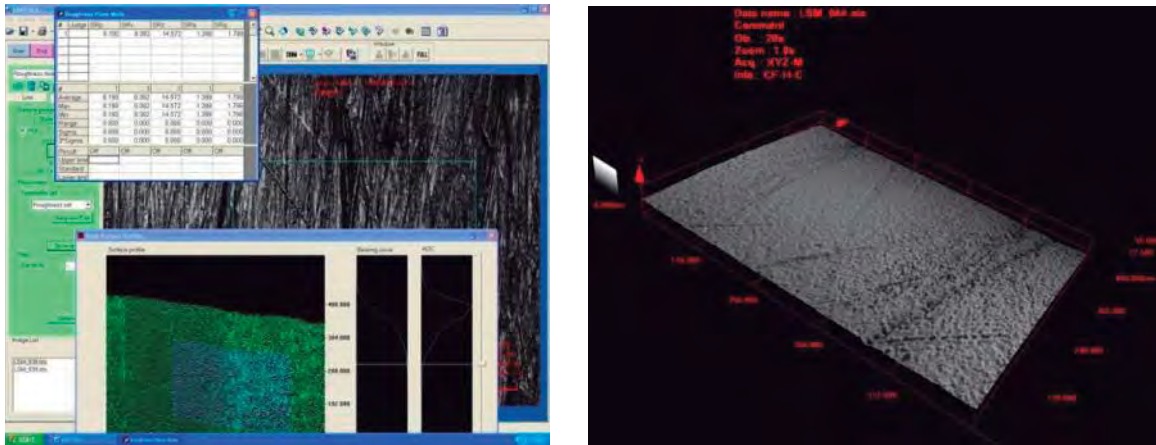
### 4.1 Condiciones de los ensayos

Los ensayos de fatiga en flexión rotativa del acero AISI SAE 1018 se realizaron a temperatura ambiente. El maquinado de las probetas se realizó lo más homogéneo posible para evitar una variación significativa en el acabado superficial.



*Figura 18. Maquinado de las probetas de acero AISI SAE 1018 en el torno de control numérico DYNA MYTE 3300 .*

La figura 19 presenta imágenes y valores observados en el microscopio laser de rugosidad en la sección estrecha en la probeta; el valor de SRz “el máximo valor de rugosidad” fue cercano a 14.6  $\mu$ .



(a)

(b)

*Figura 19. Rugosidad en la sección estrecha de la probeta: a) medida de la rugosidad en la superficie, b) representación en 3D de la rugosidad.*

La mayor disipación de energía durante los ensayos es en la zona estrecha de la probeta, por lo que se implemento un sistema de aire a presión para mantener esta zona por debajo de los 100°C. Con la restricción de temperatura mencionada, se asume que no hay variación en la microestructura de la probeta. Un extremo de la probeta fue anclado en el eje de rotación; en el otro extremo se aplico la carga P para obtener la condición de flexión rotativa. El máximo esfuerzo inducido por la carga aplicada fue alrededor de 72% del límite elástico del acero AISI SAE 1018.

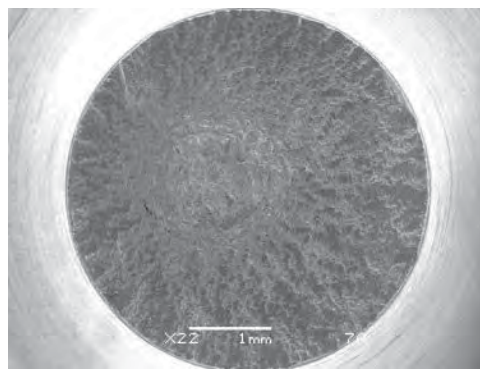
#### 4.2 Resultados de los ensayos

La tabla V muestra los resultados obtenidos para este acero de bajo carbón usando la máquina de ensayos de fatiga en flexión rotativa de alta frecuencia. Los parámetros enlistados son: numero de probeta, diámetro de la sección estrecha de la probeta  $D_0$ , carga aplicada  $P$ , esfuerzo máximo  $\sigma_{max}$ , esfuerzo de cedencia del material  $\sigma_y$ , número de ciclos de la falla  $N$  y la temperatura respectiva de la prueba  $T$ .

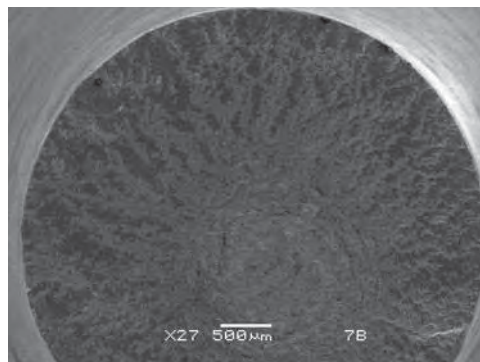
Tabla V. Resultados experimentales

Probeta	$D_0$ (mm)	$P$ (N)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$N$ (ciclos)	$T_{max}$ (°C)
1	4.0	32.3	278	386	87750	70
2	4.0	32.3	278	386	92850	68
3	4.0	32.3	278	386	50700	60
4	4.0	32.3	278	386	98550	70
5	4.0	32.3	278	386	59850	70
6	4.0	32.3	278	386	88500	75
7	4.0	32.3	278	386	46800	70
8	4.0	32.3	278	386	49500	75
9	4.0	32.3	278	386	241800	97
10	4.0	32.3	278	386	414000	80
11	4.0	32.3	278	386	115650	60
12	4.0	32.3	278	386	90750	80
13	4.0	32.3	278	386	214500	90
14	4.0	32.3	278	386	168900	82

El inicio de la falla del acero AISI SAE 1018 está relacionado a la coalescencia de microporosidades y a las zonas plásticas causadas por el alto valor de esfuerzos cercanos al límite elástico del material. La figura 20 presenta la superficie de fractura de la probeta No 7 de la tabla V, en la cual se observan claramente cavidades y surcos producidos en un material dúctil bajo altos valores de esfuerzos [41].



(a)



(b)

*Figura 20. Superficie de fractura de la probeta No. 7 de la tabla 2.*

Las cavidades y surcos son superiores en la periferia de la probeta (zona de esfuerzo máximo) y presenta un decremento concéntrico que tiende hacia el centro de la superficie de fractura. La figura 17 resume los resultados en la grafica S-N (esfuerzo-numero de ciclos).

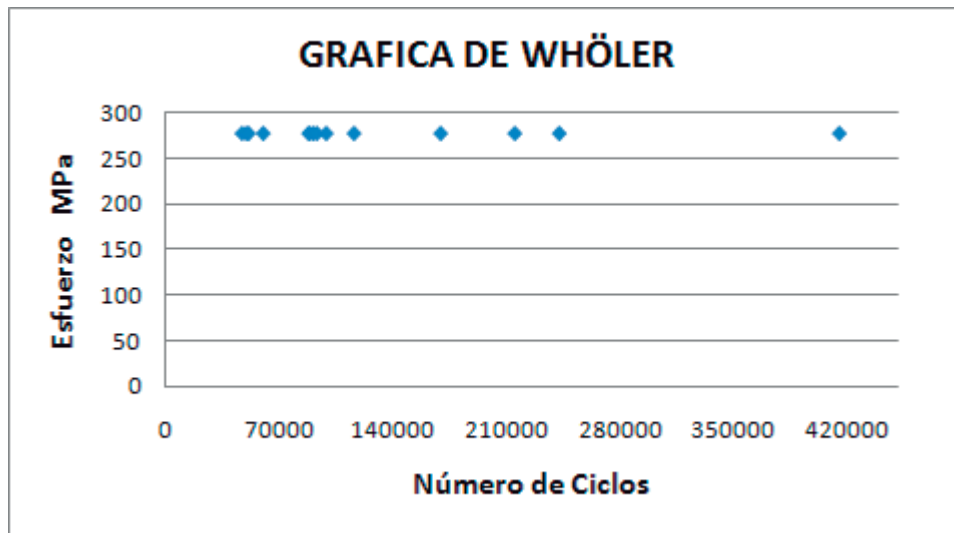


Figura 21. Resultados de la resistencia a la fatiga en flexión rotativa para el acero AISI-SAE 1018.

La resistencia a la fatiga en flexión rotativa para este acero está comprendida entre  $4.68 \times 10^4$  hasta  $4.14 \times 10^5$  ciclos cuando el valor máximo de esfuerzo en la sección estrecha de la probeta es del 72% del límite elástico del material. La figura 22 muestra el rango de la vida en fatiga ( $4.68 \times 10^4$  hasta  $4.14 \times 10^5$  ciclos) para este acero puede explicarse por el hecho de lo poco homogéneo que este es.

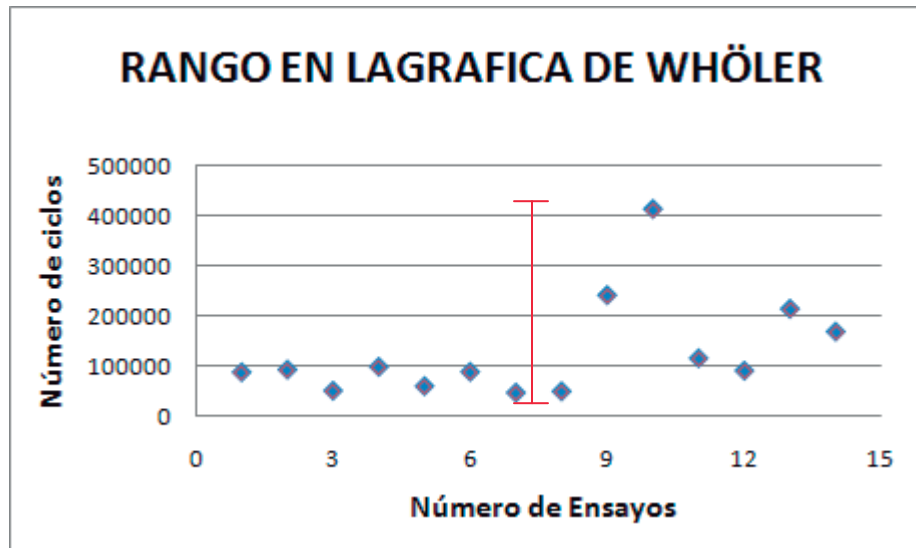


Figura 22. Rango de la vida en fatiga en flexión rotativa para el acero AISI-SAE 1018.

El inicio de la falla fue observado, en algunos casos, asociada a coalescencia de cavidades y zonas de micro o macro plasticidad; en otros casos fue relacionada a la presencia de inclusiones no metálicas, o aun a la combinación de ambos mecanismos.

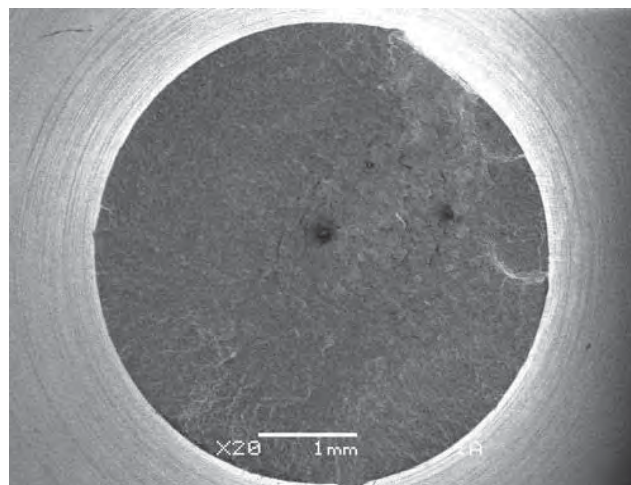
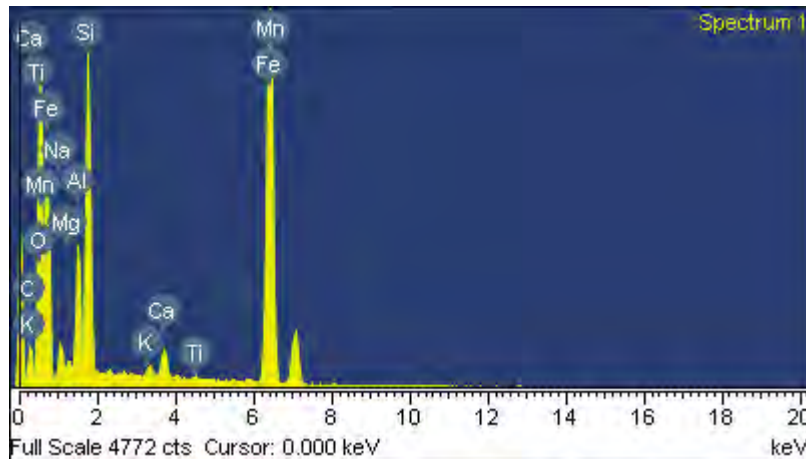


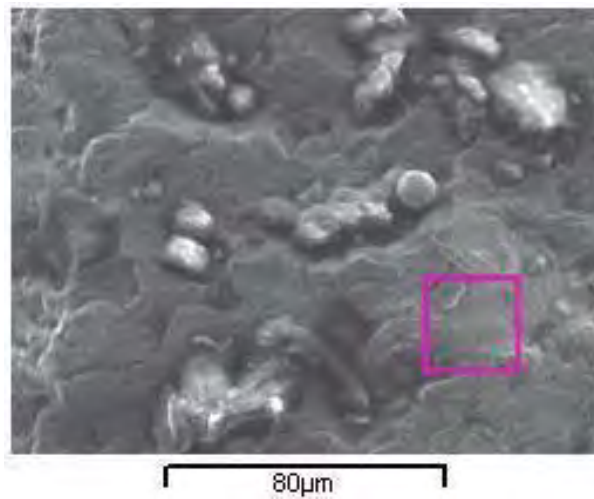
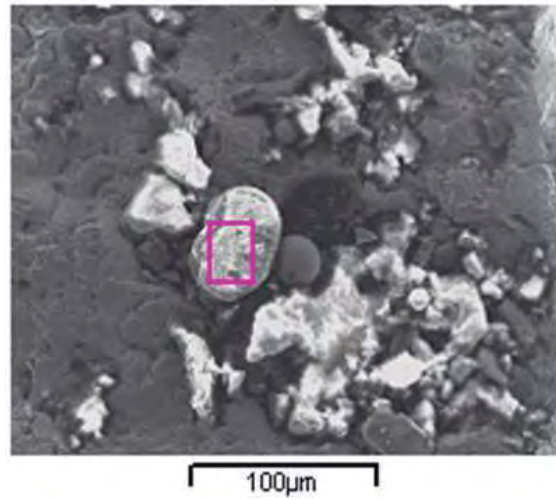
Figura 23. Inicio de falla de la probeta No.1 de la tabla, asociada a una inclusión metálica y a micro y macro deformación plástica.

En la figura 23 el tipo de inclusiones no metálicas que se presentaron en las probetas son: CaO, SiO<sub>2</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO. Un análisis químico por difracción de rayos X, muestra la presencia de estos elementos en la figura 24.



*Figura 24. Análisis por difracción de rayos X de una inclusión en la probeta No. 1 de la tabla 2.*

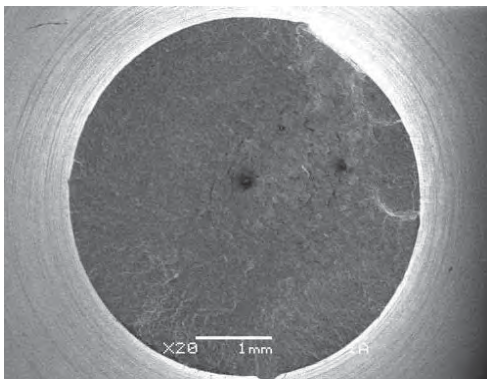
Además la figura 25 muestra la gran cantidad de impurezas existentes en diferentes zonas de la superficie de fractura de la probeta No.2 listada en la tabla V.



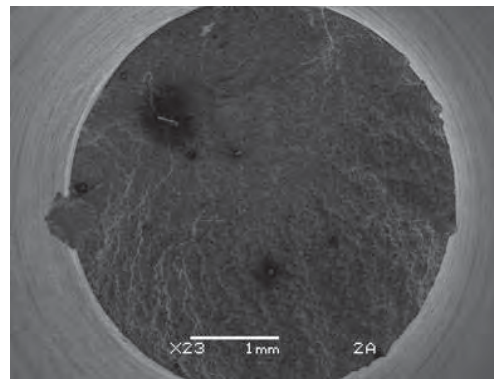
*Figura 25. Impurezas en la superficie de fractura de la probeta No. 2 de la tabla V.*

#### 4.3 Discusión de resultados

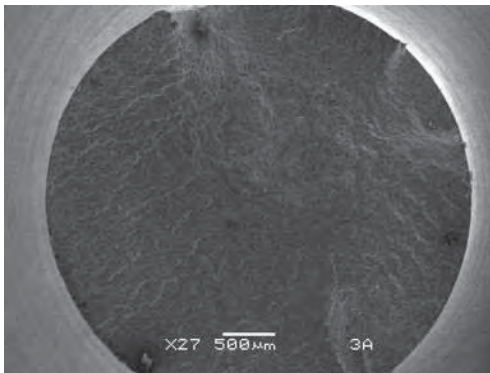
Los ensayos de fatiga en flexión rotativa del acero AISI SAE 1018 llevados a cabo bajo condiciones de carga cercana al límite elástico del material presentan una superficie típica de falla por fatiga mostrando zonas de micro y macro deformación plástica. La figura 20 muestra las superficies de fractura de todas las probetas enlistadas en la tabla V.



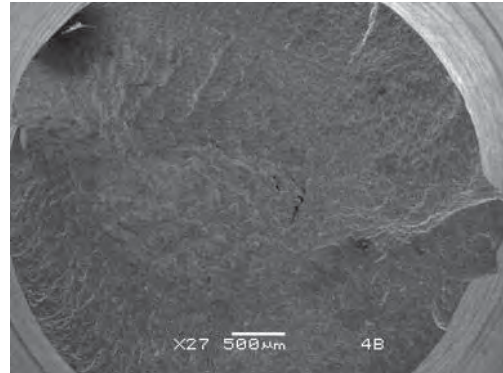
1



2



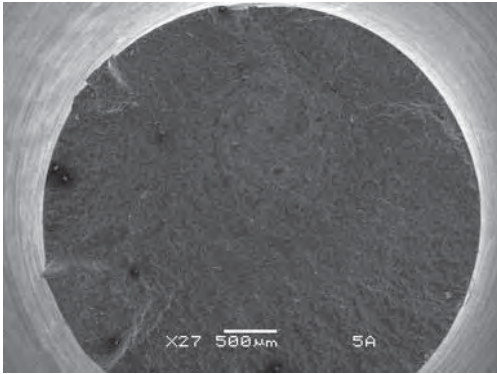
3



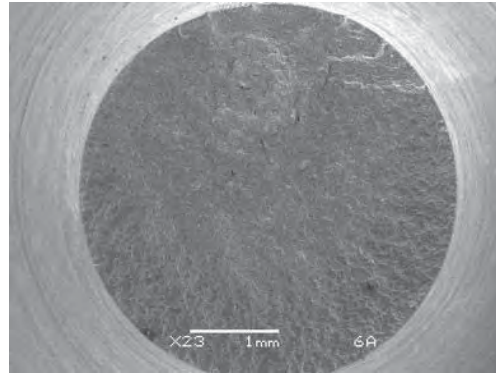
4

DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXION  
ROTATIVA DEL ACERO AISI SAE 1018, CERCA DEL LIMITE ELASTICO

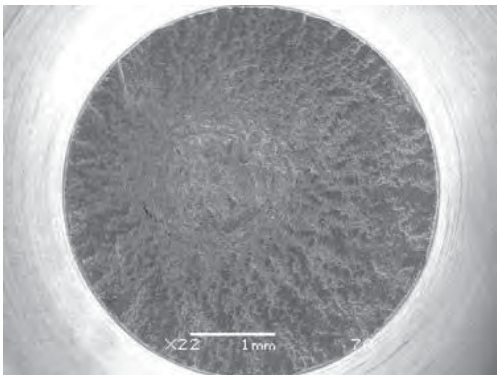
---



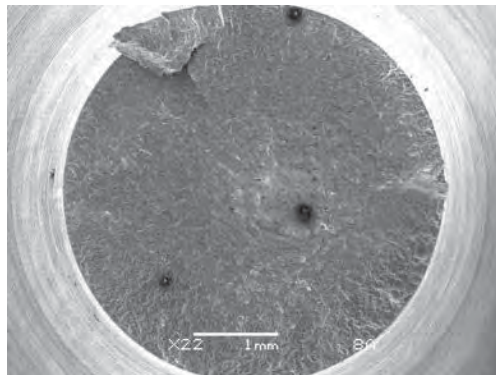
5



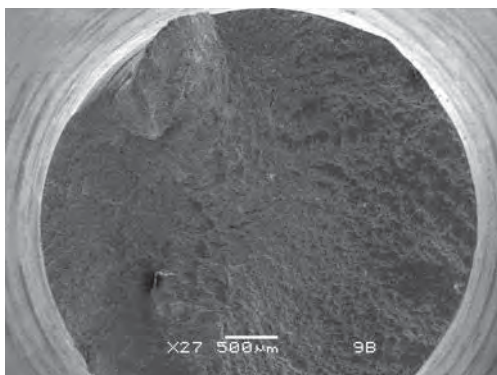
6



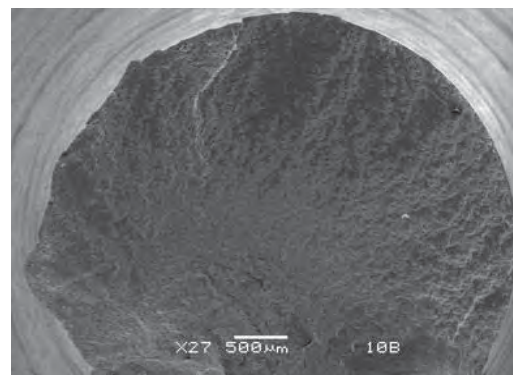
7



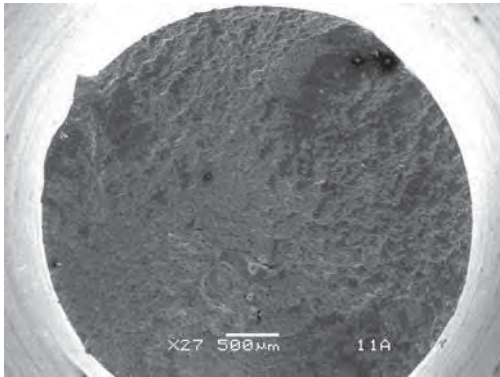
8



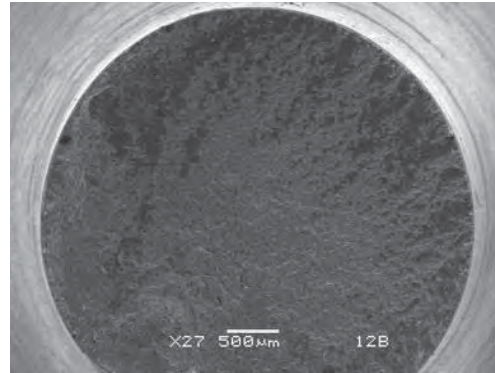
9



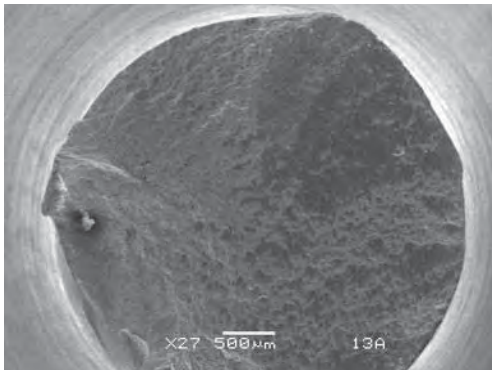
10



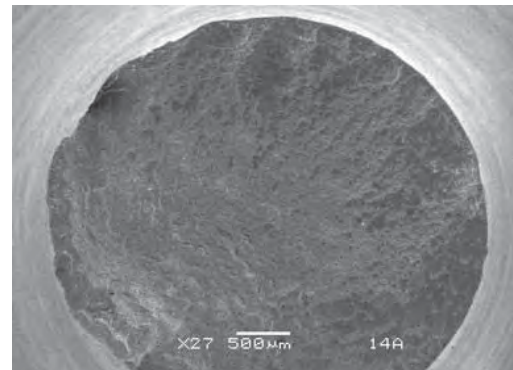
11



12



13



14

*Figura 26. Superficies de fractura de todas las probetas listadas en la tabla V.*

Los parámetros observados en la superficie de fractura para este acero: inclusiones no metálicas y zonas de micro y macro deformación plástica pueden ser relacionadas a la vida en fatiga [42, 43, 44] bajo condiciones de flexión rotativa

## CAPITULO 5 ANALISIS ESTADISTICO

En este trabajo se desarrolla un análisis estadístico para fundamentar los resultados y para que el mismo se considere valido y confiable. Este análisis inicia desde la descripción y planteamiento del problema y a través de las diferentes partes de una investigación, se suelen usar datos estadísticos para sustentar hechos y puntos de vista que se establecen como fuentes de referencia. Sin embargo, la parte que exige la presentación de los datos estadísticos de la propia investigación es cuando se presentan los hallazgos de la misma y éstos deben de presentarse en la forma más objetiva posible. Luego en la última parte de la discusión de los resultados, es que se lleva a cabo la interpretación y análisis estadístico de los datos de la investigación. La tabla VI muestra los datos de los resultados obtenidos (numero de ciclos) en este trabajo, así como los datos ordenados de menor a mayor.

Tabla VI. Datos obtenidos y ordenados de la muestra.

Datos (Número de Ciclos)	Datos ordenados (Número de Ciclos)
$X_1 = 87,750$	$X_{(1)} = 46,800$
$X_2 = 92,850$	$X_{(2)} = 49,500$
$X_3 = 50,700$	$X_{(3)} = 50,700$
$X_4 = 98,550$	$X_{(4)} = 59,850$
$X_5 = 59,850$	$X_{(5)} = 87,750$
$X_6 = 88,500$	$X_{(6)} = 88,500$
$X_7 = 46,800$	$X_{(7)} = 90,750$
$X_8 = 49,500$	$X_{(8)} = 92,850$
$X_9 = 241,800$	$X_{(9)} = 98,550$
$X_{10} = 414,000$	$X_{(10)} = 115,650$
$X_{11} = 115,650$	$X_{(11)} = 168,900$
$X_{12} = 90,750$	$X_{(12)} = 214,500$

$X_{13} = 214,500$	$X_{(13)} = 241,800$
$X_{14} = 168,900$	$X_{(14)} = 414,000$

Para hacer el análisis estadístico se utilizó en programa de computación Minitab versión 15. Tomando los datos ordenados e introduciéndolo al programa para la obtención de algunas medidas como la media y la desviación estándar, la figura 27 muestra el histograma de datos

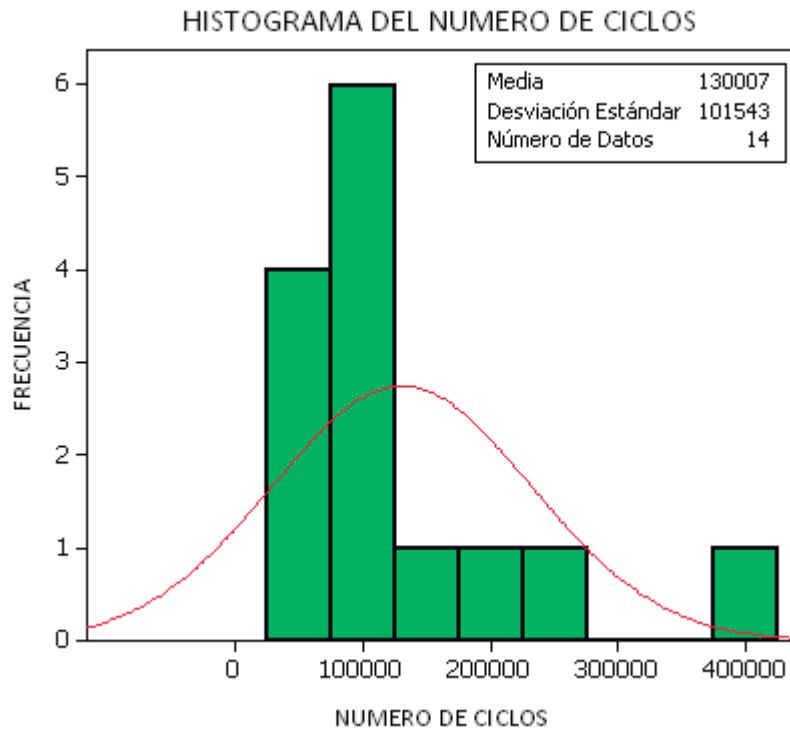


Figura 27. Histograma de datos.

Como se puede apreciar en el histograma de datos, hay un sesgo hacia la izquierda y un valor desviado (parte inferior derecha) que se va analizar posteriormente con las pruebas de normalidad. Además tenemos una media de 130,007 ciclos y una desviación estándar de 101,543. Este último valor no indica la desviación de los datos respecto de la media. Para saber si el valor que aparece en la parte inferior derecha del histograma es un valor desviado, se realiza la prueba de normalidad TN1. Como se tiene un número par de datos, los 7 valores más bajos de la muestra ordenada se sustituyen en la fórmula (a), y los 7 valores más grandes se sustituyen en la fórmula (b).

$$\text{ValoresBajos} = \frac{\text{Media} - X_{(1)}}{s} \quad (\text{a})$$

$$\text{ValoresAltos} = \frac{X_{(n)} - \text{Media}}{s} \quad (\text{b})$$

De acuerdo al valor crítico obtenido de las tablas de Grubs y Beck [45] para  $n=14$  y un nivel de significancia del 1% (estimación de error), el valor crítico es:

$$\text{ValorCrítico} = 2.659$$

Por lo tanto, si en alguna de las 14 evaluaciones de los datos ordenados en las formulas respectivas (a y/o b) resultan mayor al valor critico, entonces se tendría un valor desviado. En la tabla VII se muestra la evaluación de los datos ordenados.

Tabla VII. Evaluación de los datos ordenados para determinar valores desviados.

DATOS ORDENADOS	VALORES MENORES	VALORES MAYORES	VALORES DESVIADOS
	$\frac{Media - X_{(1)}}{Desv.Es \tan .}$	$\frac{X_{(n)} - Media}{Desv.Es \tan .}$	
$X_{(1)} = 46,800$	0.819	--	NO
$X_{(2)} = 49,500$	0.792	--	NO
$X_{(3)} = 50,700$	0.781	--	NO
$X_{(4)} = 59,850$	0.691	--	NO
$X_{(5)} = 87,750$	0.416	--	NO
$X_{(6)} = 88,500$	0.408	--	NO
$X_{(7)} = 90,750$	0.386	--	NO
$X_{(8)} = 92,850$	--	-0.365	NO
$X_{(9)} = 98,550$	--	-0.309	NO
$X_{(10)} = 115,650$	--	-0.141	NO
$X_{(11)} = 168,900$	--	0.383	NO
$X_{(12)} = 214,500$	--	0.832	NO
$X_{(13)} = 241,800$	--	1.100	NO
$X_{(14)} = 414,000$	--	<b>2.796</b>	<b>SI</b>

De acuerdo con las pruebas de normalidad TN1, el valor  $X_{(14)} = 414,000$  ciclos es un valor desviado, como se aprecia en el histograma de datos. Censurando la muestra con el valor desviado, se realiza el histograma de datos. La figura 28 muestra el histograma de la muestra censurada.

### HISTOGRAMA DEL NUMERO DE CICLOS DE LA MUESTRA CENSURADA

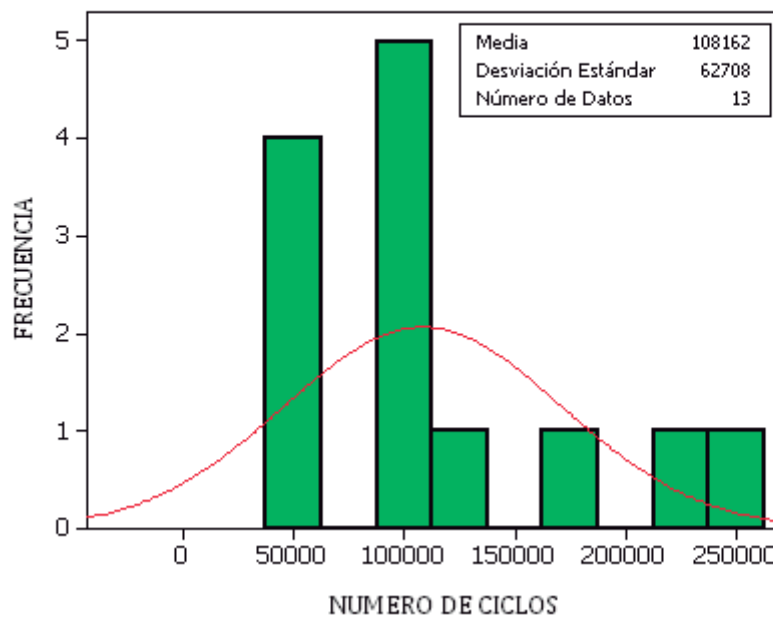


Figura 28. Histograma de datos de la muestra censurada.

El histograma de datos de la muestra censurada presenta una distribución más normal que el histograma con los 14 datos. La desviación estándar se disminuyó en un 39% respecto al primer análisis, resultando un valor de 62,708 ciclos y la media de 108,162 ciclos. Para obtener resultados más satisfactorios se debe de incrementar la muestra.

## CAPITULO 6 PREDICION DE VIDA EN FATIGA

Una forma de relacionar los parámetros de la superficie de fractura y la vida en fatiga del acero AISI SAE 1018 es el siguiente: un parámetro empírico llamado “área de macro deformación plástica en la superficie de fractura  $S_D$ ” es propuesto para formular una expresión que determine la vida en fatiga este acero bajo condiciones de fatiga en flexión rotativa cerca del límite elástico del material:

$$N = 2.5 \times 10^5 (S_D)^{1.5} \quad (1)$$

Donde  $N$  es el número de ciclos de la falla del material y  $S_D$  es un parámetro tomando en cuenta la fracción de macro deformación plástica en la superficie total de fractura y la fracción de área de la(s) inclusión(es) no metálica(s). Los valores  $S_D$  son obtenidos tomando en cuenta la fracción aproximada de macro deformación plástica  $P_Z$  y la posible presencia de inclusiones no metálicas  $I_F$  en la zona de inicio de la falla (factor inclusión) por la siguiente expresión

$$S_D = P_Z + I_F \quad (2)$$

Tomando la probeta No 1 y No 6, la figura 29 muestra como los parámetros  $P_Z$  e  $I_Z$  fueron estimados.  $P_Z$  es la cantidad de área de macro deformación plástica entre el área total de la superficie de fractura. Respecto al parámetro  $I_F$ , este es estimado dividiendo la fracción de área de la(s) inclusión(es) no metálica(s) entre el área de macro deformación plástica.

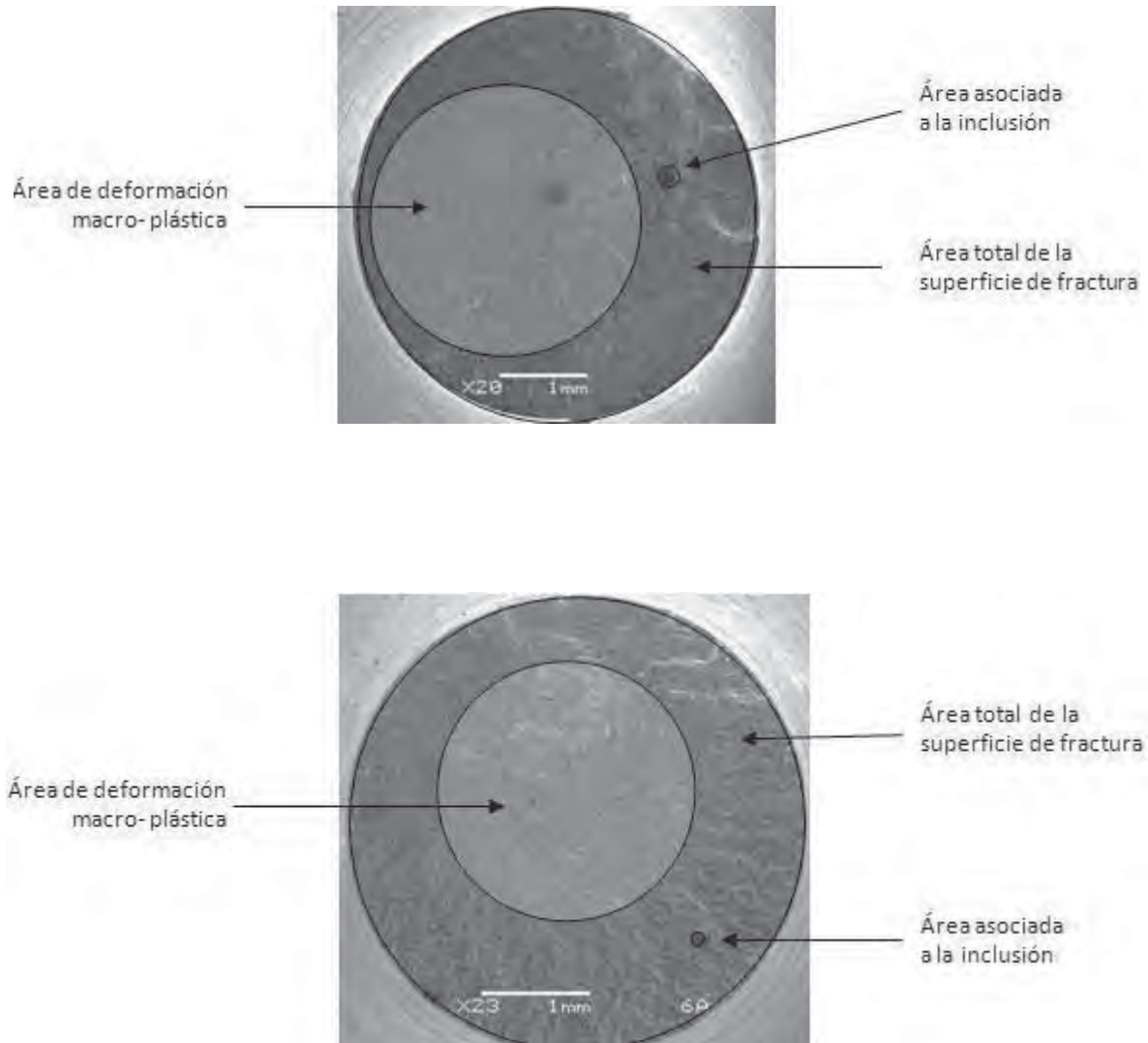


Figura 29. Estimación de los factores  $P_z$  e  $I_f$  en la probeta No 1 y No 6.

Para la superficie de factura de la probeta No. 1 y de acuerdo a la ecuación 2, el valor de  $S_D$  es 0.51 aproximadamente; sustituyendo en la ecuación 1, se tiene que  $N \approx 91,417$  ciclos. De igual manera se hace para la probeta No. 6,  $S_D$  es 0.49, lo que nos da  $N \approx 85,750$  ciclos. La tabla VIII presenta los valores calculados de  $S_D$  para todas las probetas.

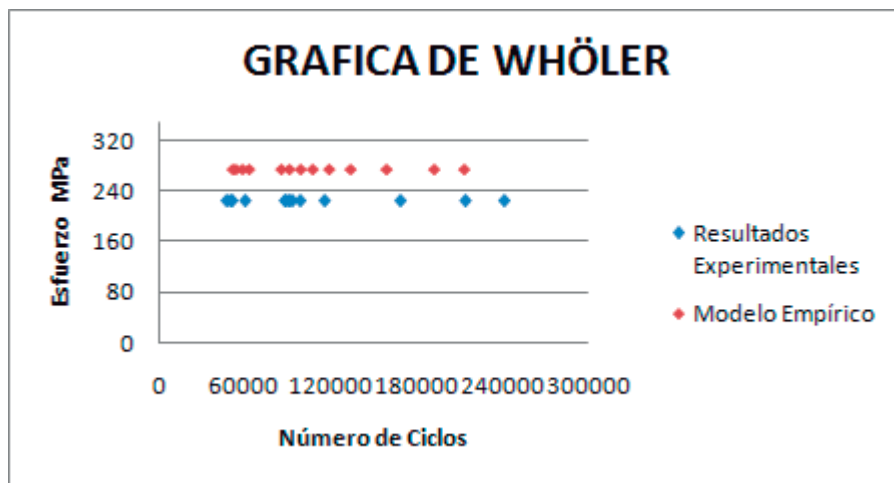
Tabla VIII. Evaluación del parámetro  $S_D$ .

Probeta	Zona Plástica Estimada	Factor de Inclusión(es)	Parámetro $S_D$
1	0.43	0.08	0.51
2	0.51	0.1	0.61
3	0.34	0.02	0.36
4	0.49	0.08	0.57
5	0.30	0.1	0.40
6	0.45	0.04	0.49
7	0.35	0.0	0.35
8	0.30	0.08	0.38
9	0.80	0.10	0.90
10	-	-	-
11	0.58	0.08	0.66
12	0.48	0.06	0.54
13	0.79	0.05	0.84
14	0.68	0.06	0.74

En la tabla IX se listan los valores experimentales de la vida en fatiga del acero AISI-SAE 1018 y los valores evaluados con la ecuación 1; ambos resultados se observan en la figura 30, en la grafica S-N (esfuerzo- número de ciclos).

Tabla IX. Vida en fatiga experimental y calculada.

Probeta	Vida en Fatiga Experimental (N)	Vida en Fatiga Calculada $N=2.5 * 10^5 (S_D)^{1..5}$
1	87750	91417
2	92850	119106
3	50700	54000
4	98550	107585
5	59850	63245
6	88500	85750
7	46800	51766
8	49500	58562
9	241800	213454
10	-	-
11	115650	134047
12	90750	99204
13	214500	192468
14	168900	159143



En la figura 30, los resultados experimentales (puntos azules) son graficados a 225MPa, sin embargo los resultados del modelo propuesto en la ecuación 1 son graficados a 275 MPa para separa los resultados y se aprecie con claridad la semejanza entre ambos resultados.

## CONCLUSIONES

Un dispositivo para ensayos en fatiga en flexión rotativa de alta frecuencia [46] ha sido construido para realizar estudios de materiales utilizados en ingeniería: aleaciones metálicas. Cabe mencionar que los dispositivos similares existentes trabajan a un régimen de 60 Hz.

Por las dimensiones de la probeta, la velocidad de giro no tiene influencia sobre la variación del esfuerzo máximo en la misma, no así en elementos que tengas diámetros mayores a 140 mm.

Respecto a la variación de la zona estrecha de la probeta, la carga P necesaria para alcanzar un esfuerzo máximo en la probeta cercano al esfuerzo de cedencia, varía de acuerdo al radio de estreches.

Para la carga P aplicada: en este caso la variación del esfuerzo máximo en la probeta es lineal, como era de esperarse en condiciones de deformación elástica.

La resistencia a la fatiga en flexión rotativa del acero AISI-SAE 1018 con cargas cercanas al límite elástico y bajo condiciones de flexión rotativa está localizada entre  $5 \times 10^4$  y  $2.5 \times 10^5$  ciclos. Este rango tan grande de resultados en los ensayos es debido a lo poco homogéneo del material con presencia de inclusiones no metálicas y a la presencia de diferentes mecanismos de inicio de falla: coalescencia de micro porosidades generadas cerca de las inclusiones o zonas plásticas cercanas a discontinuidades o inclusiones generadas por la concentración de esfuerzos.

Un modelo empírico es propuesto para calcular la vida en fatiga del acero AISI SAE 1018 bajo condiciones de flexión rotativa, provocando esfuerzos cercanos al límite elástico (72%), basado en el cálculo aproximado de las zonas de macro deformación plástica, del área de las inclusiones no metálicas y el área total de la superficie de fractura. Los resultados experimentales se muestran de acuerdo a la formulación empírica; sin embargo futuras investigaciones serán necesarias para la comprensión de las zonas de micro y macro deformación plástica asociadas con el inicio y propagación de la falla, la relevancia de las cavidades [47,48], la presencia de discontinuidades [49], o de hidrogeno [50,51] y de los diferentes factores provocadores de concentradores de esfuerzos a diferentes escalas: cristalográfica, granular y macroscópica.

## BIBLIOGRAFIA

- [1]C.R. Sohar, A. Betzwar-Kotas, C. Gierl, B. Weiss, H. Danninger, *Gigacycle fatigue behavior of a high chromium alloyed cold work tool steel*, Int. J. Fatigue, 30 (2008), p. 1137-1149.
- [2]Arnd Jung and Alexander Schnell, *Crack growth in a coated gas turbine superalloy under thermo-mechanical fatigue*, Int. J. Fatigue, 30-2 (2008), p. 286-291.
- [3]Gonzalo M. Dominguez Almaraz, *Prediction of very high cycle fatigue failure for high strength steels, based on the inclusion geometrical properties*, Mechanics of Materials, 40 (2008), p. 636-640.
- [4]František Nový, Marián Činčala, Peter Kopas, Otakar Bokůvka, *Mechanisms of high strength structural materials fatigue failure in ultra-wide life region*, Material Science. And Engineering, A 462 (2007), p. 189–192.
- [5]I. Marines, G. Domínguez, G. Baudry, J-P. Vittory, J-P Doucet, and C. Bathias, *Ultrasonic Fatigue Test on Bearing Steel AISI-SAE 52100 at Frequency Of 20 kHz and 30 kHz*, International Journal of Fatigue, Vol. 25, pp. 1037-1046, 2003.
- [6]“Whöler’s Experiments on the Strength if Metals,” Engineering, August 23, 1967, p.160.
- [7]“Whöler’s Experiments on the Strength if Metals,” Engineering, August 23, 1967, p.160.
- [8]J. Bauschinger, “On the Change of the position of the Elastic Limit of Iron and Steel Under Cyclic Variations of Stress,” Mitt. Mech-tech. Lab., Munich, Vol. 13. No. 1 , 1986.

- [9]J.A. Erwing and J.C. W. Humfrey, "The Fracture of Metals Under Repeated Alterations of Stress", Phil Trans. Roy. Soc., London, Vol. CC, 1903, p241.
- [10]O.H. Basquin, "The Experimental Law of Endurance Test," Proc. ASTM, Vol 10. Part II, 1910. p. 625.
- [11]H.J. Gough, The Fatigue Of Metals, Scott, Greenwood and Son, London, 1924.
- [12]H.F. Moore and J.B. Kammers, The Fatigue of Metals, McGraw-Hill Book Co., New York, 1927.
- [13]A.A. Griiffith "The Phenomena of Ruoture and Flow in solids", Trans, Roy. Soc., London, Vol. A221, 1920, p. 163.
- [14]B.P. Haigh, "The Relative Safety of Mild and High-Tensile Alloy Steels Under Alternating and Pulssating Stresses," Proc. Inst. Automob. Eng., Vol. 24, 1929/1930, pag. 30.
- [15]J.O Almen and P.H. Black, Residual Stresses and Fatigue in Metals, McGraw-Hill Book Co., New York, 1963.
- [16]O.J. Horger and T. L. Maulbetsch, "Increasing the Fatigue Strength of Press Fitted Axle Assemblies by Cold Rolling," Trans. ASME, Vol. 58, 1936,p. A91.
- [17]H.Neuber, Kerbspannungsehre, Springer-Verlag, Berlin, 1937 (in German); also theory of Notches, J.W. Edwards, Ann Arbor, MI, 1946.
- [18]E.Gassner, "Festigkeitsversuche mit Wiederholter Beanspruchung im Flugzeugbau," Deutsche Lufwacht, Ausg. Luftwissen, Vol. 6, 1939, p. 43 (in German).

- [19]M.A. Minner, "Comulative Damage in Fatigue," Trans. ASME, J. Appl. Mech, Vol. 67, 1945, p. 159.
- [20]A.Palmgren, "Dic Lebensdauer von Kugellagern," "ZDVDI", Vol. 68, No. 14, 1924, p. 320.
- [21]R.E. Peterson "Notch Sensivity," Metal Fatigue, G. Sines and J.L. Waisman, eds., McGraw-Hill Book Co., New York, 1959, pag. 293.
- [22]R.E. Peterson, Stress Concentration Design Factors, John Wiley and Sons, New York, 1953.
- [23]R.E. Peterson, Stress Concentration Factors, John Wiley and Sons, New York,1974.
- [24]G.R. Irwin, "analysis of Stresses and Strain Near the End of a Crack Traversing a plate," Trnas. ASME, J. Appl. Mech. Vol. 24, 1957, p. 361.
- [25]W. Weibull, "A Statical Distribution Function of Wide Applicability," J. Appl. Mech., Sept. 1951, p. 293.
- [26]P.C. Paris, M.P. Gomez, and W.E. Anderson, "A Rational Analytical Theory Of Fatigue," Trend Eng., Vol. 13, No. 9, 1961. p. 9.
- [27]J. Schijve and D. Broek, "Crack Propagation Test Based on a Gust Spectrum with Variable Amplitude Loading." Aircraft Eng., Vol. 34, 1962. pag. 314.
- [28]J.A Bennett and H. Mindlin, "Metallurgical Aspects of the Failure of the Point Pleasant Bridge," J. Test. Eval., Vol I, No. 2, 1973, p. 152.

- [29]W. Elber, "Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension," Eng. Fracture Mech. Vol. 2, No. 5, 1970.
- [30]P.C. Paris, "Testing for Very Slow Growth Of Fatigue Cracks", Closed Loop, Vol.2, No.5, 1970.
- [31]R.A. Schmidt and P.C. Paris, "Threshold for Fatigue Crack Propagation and the Effects of Load Ratio and Frequency," Prog. Fract. Growth Fract. Toughness Testing, ASTMSTP 536, ASTM, West Conshocken, PA, 1973. p. 79.
- [32]W. Schütz, "Standardized Stress-Time Histories- An Overview," Development of Fatigue Loading Spectra, J.M. Potter and R.T. Watanabe, ed., ASTM STP 1006, ASTM, West Conshocken, PA, 1989. p. 3.
- [33]L.E. Tucker and S.L. Bussa, "The SAE Cumulative Fatigue Damage Test Program," Fatigue Under Complex Loading, R.M. Wetzel, ed., SAE Warrendale, PA, 1977.p. 1.
- [34]M.V. Brown and K.J. Miller, "A Theory for Fatigue Failure Under Multiaxial Stress Strain Conditions," Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 187, No. 65, 1973,p. 745.
- [35]R.P. Reed, J.H Smith and B.W Christ "The Economic Effects of Fracture in the United States," U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Special Publication 647, march 1983.
- [36]N. Oguma, H. Harada, T. Sakai "Strength level dependence of long-life fatigue behavior for bearing steels in rotating bending", Proc. 3rd VHCF Int. Conf. Eds. T. Sakai and Y. Ochi, University of Electro-Communications pub. Tokyo, Japan (2004), pp. 617-624.

- [37]T. Sakai, T. Murase, S. Yoshiyama, T. Tadahiko, M. Takeda “Rotating bending fatigue property of structural steels having different strength levels in gigacycle regime”, Proc. 3rd VHCF Int. Conf. Eds. T. Sakai and Y. Ochi, University of Electro-Communications pub. Tokyo, Japan (2004), pp. 641-648.
- [38]H. Itoga, H.N. Ko, K. Tokaji, M. Nakajima “Effect of inclusion size on step-wise S-N characteristics in high strength steels”, Proc. 3rd VHCF Int. Conf. Eds. T. Sakai and Y. Ochi, University of Electro-Communications pub. Tokyo, Japan (2004), pp. 633-640.
- [39]Nondestructive Testing Handbook, 2nd., Vol. 1-10, ASNT, Columbus, OH, 1982-1993.
- [40]G. Domínguez Almaraz, J. Soriano Peña, H. Gutiérrez Sánchez, *Rotating bending fatigue simulation of hourglass shape specimen of AISI-SAE C1020 steel*, Proc. 9<sup>th</sup> International Fatigue Congress, Atlanta, Georgia, USA, 2006.
- [41]ASM Handbook, Formerly Ninth Edition, Metals Handbook, Volume 12, *Fractography*, ASM International, The Metals Information Society, 1987.
- [42]H. Itoga, H.-N. Ko, K. Tokaji, M. Nakajima, *Effect of inclusion size on step-wise S-N characteristics in high strength steels*, Proc. 3<sup>rd</sup> VHCF Int. Conf. Eds. T. Sakai and Y. Ochi, University of Electro-Communications pub. Tokyo, Japan (2004), p. 633-640.
- [43]Toshio Mura, *Micromechanics of Defects in Solids*, 2<sup>nd</sup> Edition, Springer 1987, ISBN: 978-90-247-3256-2.
- [44]A.S. Krausz, J.I. Dickson, J-P. A. Immarigeon, W. Wallace, *Constitutive Laws of Plastic Deformation and Fracture*, Springer 1990, ISBN: 978-0-7923-0639-9.

- [45] Grubbs, F. E.; Beck, G.: Extension of sample sizes and percentage points for significance tests of outlying observations. En: *Technometrics*, vol. 14, 1972, págs. 847-854.
- [46] G. Dominguez Almaraz, M. Guzmán Tapia, "A new high speed (150 Hz) Rotating bending fatigue test machine", Fourth International Conference on Very High Cycle Fatigue (VHCF- 4), University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA, August 19 -22 2007, pp. 153-160.
- [47] X. L. Xu, Z. W. Yu, *Failure analysis of a diesel engine connecting rod*, Journal of Failure Analysis and Prevention, Vol. 7, Number 5, Springer Boston 2007, p. 316-320.
- [48] M.O. Wang, R.H. Hu, C.F. Qian, J.C.M. Li, *Fatigue crack growth under mode II loading*, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 18 Issue 12 (2007), p. 1443-1454.
- [49] F. Casanova del Angel, J.C. Artega-Arcos, *Theoretical model of discontinuities behavior in structural steel*, Ingeniería Investigación y Tecnología IX, 2 (2008), p. 131- 148.
- [50] I. Chatteraj, *The effect of hydrogen induced cracking on the integrity of steel components*, Springer India, Vol. 20 (1995), p. 199-211.
- [51] Y. Murakami, *The effect of hydrogen on fatigue properties of metals used for fuel cell system*, Int. Jour. of Fracture, Vol. 138 (2006), p. 167-195