

Análisis numérico experimental de un rin de aleación AlSi₇Mg

Israel Saucedo-Meza

Omar Mata-Lucero

Luis Tirado-Delgado

Juan de Dios Ocampo-Díaz

Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Baja California,
Unidad Universitaria, Blvd. Benito Juárez s/n, C.P. 21900
Mexicali, B.C.
MÉXICO

Recibido el 3 de noviembre de 2004; aceptado el 13 de abril de 2005.

1. Resumen

En el presente trabajo se hicieron investigaciones del comportamiento de un rin de aleación AlSi₇Mg, el cual es usado en automóviles compactos de *Volkswagen* (VW). Para esto, se realizó análisis experimental y numérico. En el primero se utilizó una máquina para prueba de fatiga de momento flexionante, un equipo de medición de láser escáner donde se detectaron las zonas de concentraciones de esfuerzos y la máxima amplitud de desplazamiento en el rin. Mientras que en el segundo se obtuvieron los esfuerzos que ocasionaban la fatiga por el elemento finito, utilizando los paquetes de cómputo Ansys y Catia. La diferencia de los ciclos de vida de fatiga obtenidos entre ambos análisis fue del 0.6 %. Mientras que el tiempo que se optimizó por el MEF, fue de un 85% menos que el análisis experimental.

2. Abstract (Numerical-Experimental Analysis of a Rin AlSi₇Mg Alloy)

The present work shows the results obtained from an investigation made on the behaviour of a rin of alloy AlSi₇Mg, which is used in compact Volkswagen's cars. Due to two kind of analysis were realized, firstly an experimental and numerical analysis was done, using a special machine for test the flexionante torque and material fatigue, besides was used an equipment of laser to scanner zones with strength concentrations and the maximum displacement amplitudes. The second analysis was done with the finite element technique, using the softwares ANSYS and CATIA. The

difference between life fatigue cycles obtained from the two analyses was 0.6 %. While the time optimize by MEF, was of 85 % less than experimental analysis.

Palabras clave: amplitud, concentración de esfuerzos, fatiga, ciclos de vida.

3. Introducción

En la actualidad la tecnología avanza a pasos enormes, el desarrollo de nuevos materiales marca la pauta entre la competitividad y la obsolescencia, en estos tiempos se busca que los materiales sean más ligeros, resistentes tanto a esfuerzos como a corrosión, sin dejar de mencionar a la fatiga que es un grave problema a nivel mundial. De acuerdo con estudios independientes realizados por Forrest en 1982 [1], entre el 80 y el 90% de todas las fallas estructurales ocurren por fatiga, afirmando que esto podría ser reducido en un 29% con la aplicación de la tecnología de fatiga existente.

Al obtener una estimación de la vida útil del componente, se permite identificar posibles deficiencias geométricas presentes en el diseño, dando mayor flexibilidad al diseñador de realizar los cambios pertinentes. Esto nos lleva a la optimización de tiempos y selección de materiales. Por lo tanto, el objetivo principal del presente proyecto, es realizar un análisis experimental numérico de fatiga de momento flexionante para un rin automotriz de aleación AlSi₇Mg, permitiendo garantizar la resistencia del elemento, lo cual se refleja directamente en la seguridad del usuario.

Los análisis numéricos se llevan a cabo con el método del elemento finito, teniendo como base los requerimientos y procedimientos de los estándares nacionales e internacionales para su aplicación.

4. Desarrollo

4.1 Descripción del problema

Una de las principales prioridades de VW, es la realización de las diversas pruebas de fatiga en los componentes dinámicos como es el caso del rin. Éste es definido como el miembro que soporta a la llanta o al ensamble tubo-llanta. Según su aplicación, se dividen en rines para vehículos de pasajeros, para autobuses,

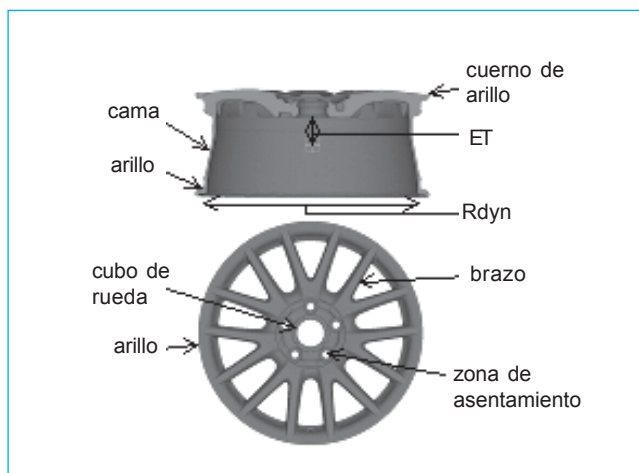


Fig. 1. Nomenclatura básica de un rin.

camiones y tractocamiones. El rin, aparte de ser un elemento de seguridad, se considera que es estético; debe permitir buena ventilación a los frenos y asegurar conexión con el eje. La mayoría de los automóviles y vehículos comerciales ligeros están acondicionados con rines de hoja de acero formado en frío, debido a que son económicos, tienen alta resistencia y se les da servicio fácilmente. Además, están compuestos de un aro y un disco firmemente soldados.

Otros tipos de rines son los usualmente llamados, de forma incorrecta, rines de aluminio, estos rines de aleación son principalmente manufacturados usando fundición a baja presión, y generalmente son aleaciones de aluminio con contenido de silicio tratados térmicamente, por ejemplo, GK $AlSi_{11}Mg$, GK $AlSi_7MgT$ [2].

Todo rin automotriz, sea de acero o de aleación, tiene parámetros de resistencia debido a las cargas que soporta. Éste tiene que absorber fuerzas verticales, laterales y longitudinales, transmitiéndolas al cubo de rueda a través de los birlos de apriete, por lo que juega un papel fundamental en la seguridad del usuario.

En el desarrollo del presente proyecto se definen las condiciones de análisis para cualquier rin con centro integrado, así mismo se realiza una comparación entre el análisis numérico y experimental que permite establecer una metodología de simulación durante el diseño conceptual para predecir la vida útil, bajo carga acelerada, en la prueba de fatiga dinámica flexionante, simulando por medio del MEF el comportamiento de la máquina de fatiga IP/40 de RMS.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del rin de aleación $AlSi_7Mg$.

Propiedad	Ideal	Real	Unidad
Módulo de Young	72.50	71.40	GPa
Relación de Poisson	0.33	-----	-----
Resistencia de cedencia	190.00	185.95	MPa
Resistencia última de tensión	240.00	227.02	MPa
Densidad	2686.00	2614.60	kg/m ³

4.2 Nomenclatura básica

Dentro de la estructura de un rin, cada zona es importante para el buen funcionamiento de éste. El presente trabajo considera dos características que intervienen directamente en el análisis de fatiga, las cuales son: el ET y el Rdyn (figura 1). El primero es la excentricidad que existe en la zona de asentamiento, la cual hay que tener en cuenta para evitar cualquier contacto con las mordazas que sujetan al rin en el análisis experimental. Mientras que el segundo es el radio dinámico, y es primordial al momento de realizar el análisis de las cargas que soporta el rin; así mismo, en su aplicación es importante la selección correcta de éste para evitar una colisión entre la llanta y el guardafango.

Para esto, los valores más importantes considerados en los análisis del rin 025Q son:

ET (distancia del centro del rin a la cara interior) = 0.038 m

Rdyn (radio dinámico del rin) = 0.308 m

Radlast (carga máxima soportada por el rin) = 550 kg

Por otra parte, todos los rines fabricados para uso en automóviles de pasajeros, por norma [3] deben pasar tres pruebas principales antes de acreditar los parámetros de diseño, estas tres pruebas son: *fatiga radial*, *impacto* y *fatiga dinámica flexionante*.

4.3 Análisis experimental del rin

En el análisis experimental se utiliza la aleación $AlSi_7Mg$, la cual es obtenida mediante un proceso de fundición y generalmente está acompañada de un tratamiento térmico para

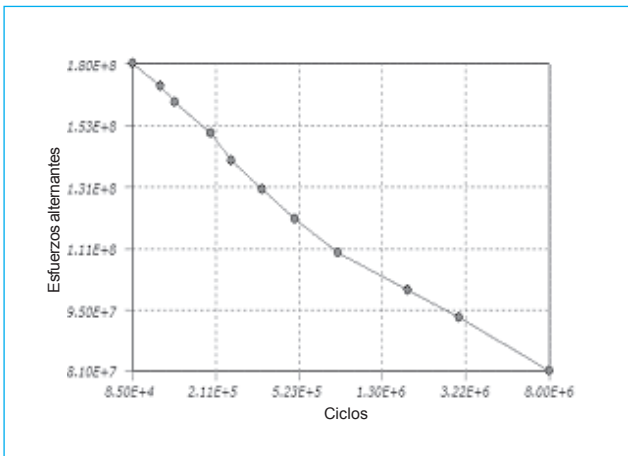


Fig. 2. Curva de fatiga de la aleación AISi₇Mg [4].

adquirir propiedades específicas. Las principales aplicaciones de esta aleación son: rines, carcassas de bombas y de transmisiones, bloques cilíndricos de enfriamiento por agua, instalaciones de energía nuclear entre otras, donde se requieran buenas características de fundición, soldabilidad, alta resistencia a la corrosión y al esfuerzo [2].

Las propiedades mecánicas de la aleación AISi₇Mg se presentan en la tabla 1, y la curva de fatiga en la figura 2.

4.3.1 Análisis de vibraciones

El objetivo de este análisis es establecer las zonas dinámicas más débiles del rin para que sean instrumentadas y evaluar,

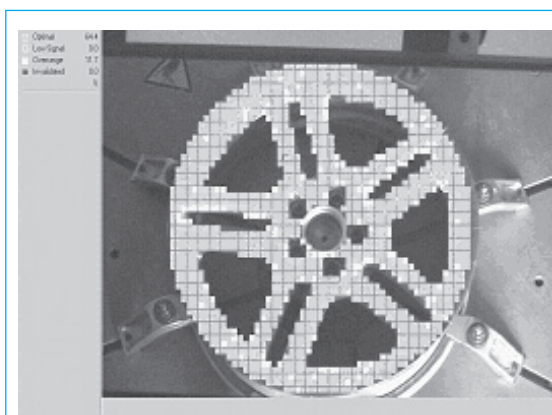


Fig. 3. Sujeción del rin en la máquina de fatiga.

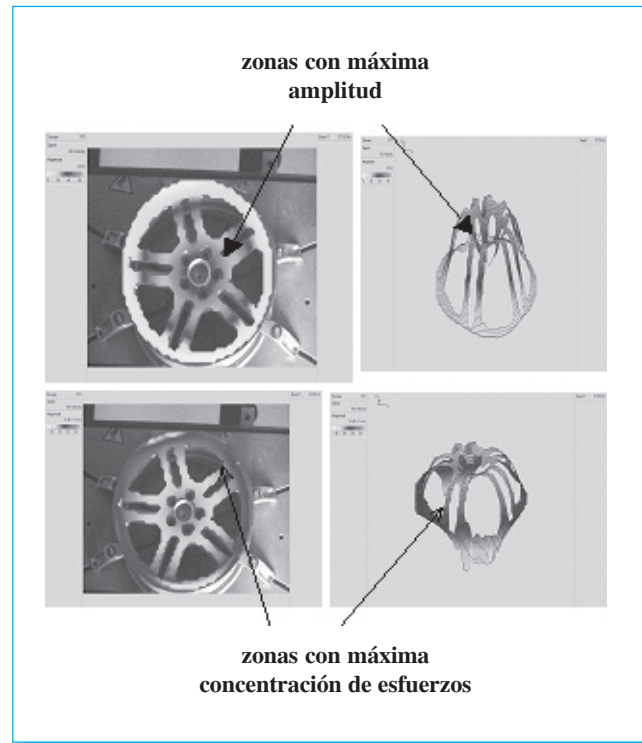


Fig. 4. Amplitudes y concentraciones de esfuerzo obtenidas por *VibraScan*.

experimentalmente, los valores de deformación y esfuerzos presentes.

En la prueba se utiliza un equipo de medición denominado *laser scanner vibrometer* o *VibraScan*, para medir las zonas de concentración de esfuerzos y las máximas amplitudes de deformación en el rin.

Para esto es necesario adherir un papel reflejante y una maya sobre la superficie del rin, con lo que es posible establecer el número de puntos de medición. Posteriormente se sujeta el rin en la máquina de fatiga (figura 3) y se pone en marcha. Se pasa un escáner láser sobre la superficie donde se encuentra la malla y el papel reflejante para detectar las zonas de mayor amplitud y concentración de esfuerzos. Con esto, se determina el modo de vibración y se predice el comportamiento de la pieza, así como sus posibles zonas de falla, esto con base en su rigidez y las concentraciones de esfuerzos.

Los resultados del *VibraScan* detectaron las zonas con máxima amplitud y máxima concentración de esfuerzos, como se muestra en la figura 4. Para esto se considera que las zonas con máxima concentración de esfuerzos son las que tienen

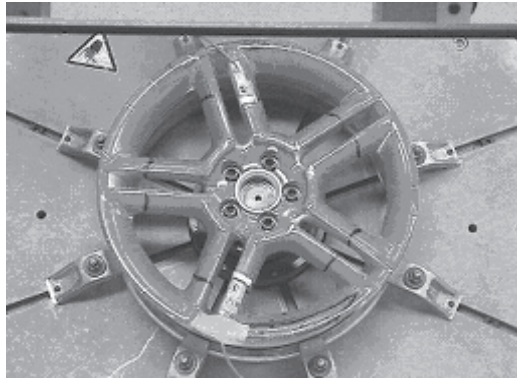


Fig. 5. Instrumentación del rin con galgas extensométricas.

posibilidad de falla, por lo que éstas se instrumentan con galgas extensométricas (figura 5).

Los resultados de las galgas extensométricas de la figura 5 muestran una amplitud máxima de deformación de 0.1875 mm, calculada a partir de las variaciones de voltaje obtenidas por dichas galgas.

4.3.2 Análisi experimental de fatiga

De acuerdo con la norma NMX-D-136-CT-1988, cualquier rin sometido a la prueba de fatiga dinámica flexionante debe hacerlo a dos cargas: baja y alta que corresponden al 50% y al 75 % del momento máximo calculado con la ecuación 1.1. En el presente proyecto se considera el máximo, siendo éste el que ocasionaría un mayor daño a la aleación.

$$M_{b\text{m}\acute{a}\text{x}} = 2 * R_{d\text{last}} * 9.81 * ((0.9 * R_{d\text{dyn}}) + ET) \quad (1.1)$$

donde:

$M_{b\text{m}\acute{a}\text{x}}$ = momento máximo soportado por el rin.

$R_{d\text{last}}$ = carga máxima soportada por el rin.

$R_{d\text{dyn}}$ = radio dinámico del rin.

ET = distancia del centro a la cara interior del rin.

Por lo que el valor del momento máximo es:

$$M_{b\text{m}\acute{a}\text{x}} = 2 * (550 \text{ kg}) * 9.81 \text{ m/s}^2 * ((0.9 * 0.308 \text{ m}) + 0.038 \text{ m})$$

$$M_{b\text{m}\acute{a}\text{x}} = 3400 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Por lo tanto, en la prueba de fatiga se aplica un momento máximo de 3.4 kN-m, a una frecuencia de 27.5 Hz.

Esta prueba muestra, por medio de una gráfica circular, la deformación máxima en la parte inferior del brazo, por lo

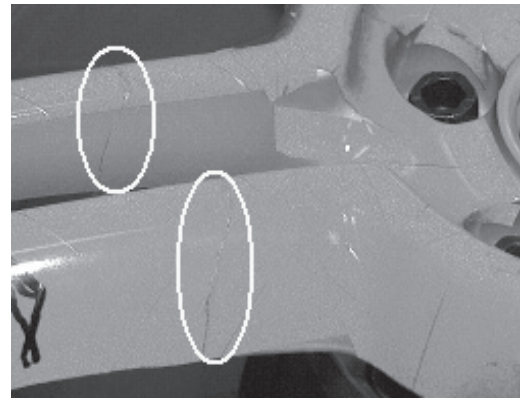


Fig. 6. Grietas presentadas por fatiga después del análisis experimental.

que en esta área se presenta la fractura, como se aprecia en la figura 6.

Los resultados obtenidos de dicha prueba de fatiga, arrojaron un número de ciclos soportados antes de la fractura (figura 6), de 1 511 088 ciclos en un tiempo de 15 horas y 26 minutos.

4.4 Análisis numérico del rin

El análisis numérico se realizó con Catia V4 y Ansys. Para esto, después de ser modelado el rin de aleación $AlSi_7Mg$ (figura 7), se consideró un elemento Tetrahedron para crear la red de elementos finitos, resultando 101 978 nodos y 56 019 elementos (figura 8).



Fig. 7. Rin de aleación.



Fig. 8. Red de elementos finitos.

Las restricciones en el modelo corresponden a las que se aplican en la máquina de prueba experimental de fatiga (figura 5). El rin es sujetado alrededor de la base del arillo proporcionándole suficiente rigidez para que, cuando se aplique el momento, los brazos estén expuestos a flexión y torsión.

El momento se aplica en la cara posterior de la zona de sujeción con los birlos sobre el eje x , siendo este de 3.4 kN-m. Esto es debido a que el esfuerzo más crítico presentado en la prueba de momento flexionante, existe cuando el esfuerzo se aplica directamente en un solo brazo (figura 9). Además de lo anterior, se considera un material homogéneo, lineal e isotrópico.



Fig. 9. Aplicación del momento flexionante sobre un solo brazo.

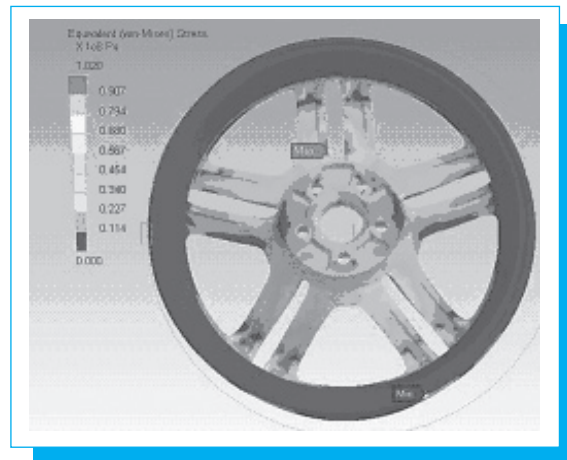


Fig. 10. Esfuerzo de flexión sobre un brazo.

Los esfuerzos y deformaciones primeramente se calculan por Ansys, donde se utiliza la teoría de Von Mises. Los resultados obtenidos arrojaron un esfuerzo máximo de 102 MPa, además de permitir apreciar las zonas más débiles de la estructura, como se muestra en la figura 10.

Dado que el esfuerzo máximo presentado en la figura 10 es de 102 MPa, éste no excede el límite de cedencia del material ($\sigma_y = 186$ MPa), por lo que se considera que la pieza no fallará cuando la carga que se aplique sea estática y de esta magnitud. En la figura 11 se observa que el factor de seguridad es mayor a 1 en el área de los brazos del rin, por lo que a este nivel de esfuerzos la estructura es segura.

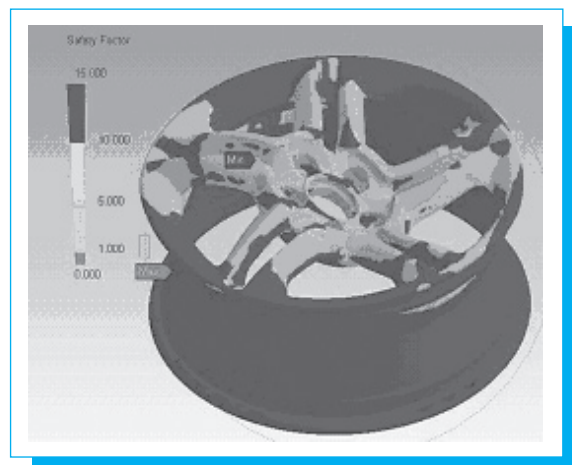


Fig. 11. Factor de seguridad.

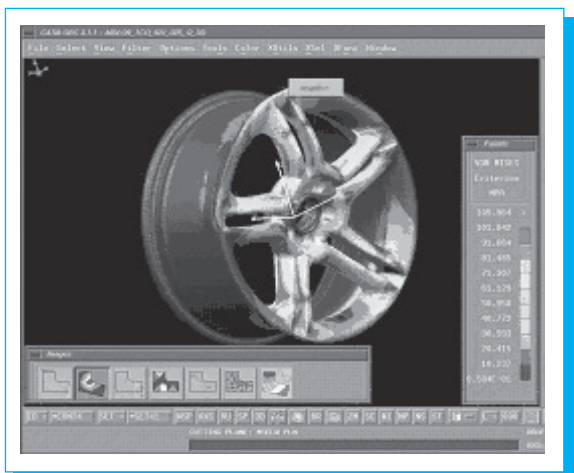


Fig. 12. Esfuerzo de flexión sobre el eje x.

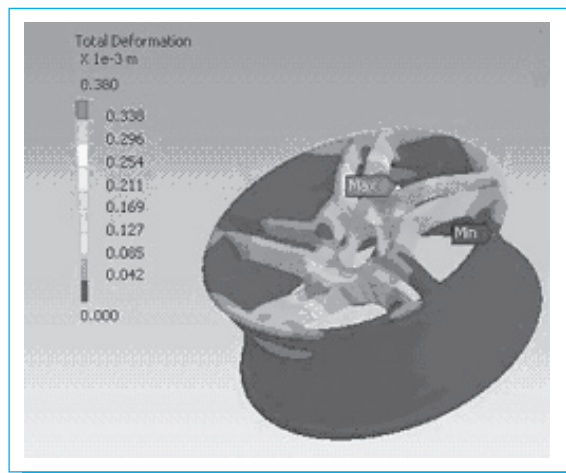


Fig. 13. Desplazamientos por Ansys.

En la figura 12 se muestran los resultados de los esfuerzos a flexión obtenidos por Catia V4, aplicando el momento máximo de 3.4 kN-m. Con esto se obtiene un esfuerzo máximo de 101.84 MPa, siendo éste prácticamente el mismo que se obtiene por Ansys, por lo que se determina que el rin operará de forma segura con las condiciones de carga estática consideradas.

Por otra parte, el desplazamiento máximo presentado por Ansys, es de 0.38 mm (figura 13). En esta figura se observa que la zona de mayor desplazamiento se presenta en el lado opuesto de mayor esfuerzo. Sin embargo, los desplazamientos que se presentan en el área donde se encuentran los esfuerzos máximos son de alrededor de 0.2013 mm.

Los resultados del esfuerzo principal entre Catia y Ansys, fueron comparados, resultando una diferencia menor al 1 %, lo cual se muestra en la tabla 2.

Respecto al análisis de fatiga se utiliza la regla de Miner, la cual indica que el número de ciclos aplicados entre el número de

ciclos soportados a un determinado nivel de esfuerzos, no debe ser mayor que uno, de lo contrario, teóricamente el componente presentaría una fractura.

Para el análisis de fatiga del rin por elemento finito, se considera el esfuerzo principal máximo de 102 MPa (figura 10), y se introduce al software la curva de fatiga del material (figura 2). Debido a esto, se obtiene que el número de ciclos soportados antes de presentarse una grieta, para un nivel de esfuerzos de 102 MPa, es de 1 520 210 ciclos. Respecto al análisis experimental, el rin de aleación AlSi₇Mg fue llevado hasta la fractura, soportando un número de ciclos de 1 511 088.

En la tabla 3, se presentan los ciclos de fatiga obtenidos por el análisis experimental y el numérico.

Tabla 2. Esfuerzos obtenidos por análisis numérico.

Esfuerzo máximo en Ansys	102 MPa
Esfuerzo máximo en Catia V4	101.84 MPa
Porcentaje de diferencia	0.15 %

Tabla 3. Comparación de resultados. A. Experimental, B. Numérico.

A	Ciclos de fatiga	1 511 088
	Tiempo de prueba	15 hrs. 26 min.
	Deformación máxima	0.1875 mm
B	Ciclos de fatiga	1 520 210
	Tiempo de prueba	2 hrs. 30 min.
	Deformación máxima	0.2013 mm

concentración de esfuerzos obtenidos mediante el láser escáner. Sin embargo, se estableció que en realidad los puntos más débiles son aquellos en los cuales se presenta la máxima amplitud de vibración, es decir, la zona con mayores esfuerzos.

Por otra parte, el análisis experimental se llevó hasta la ruptura, presentándose la fractura en el área que se ubica el esfuerzo principal máximo, lo cual fue determinado por el análisis numérico.

Es de esperarse que el análisis numérico arroje un número de ciclos mayor que el soportado en el análisis experimental. Esto es debido a que en los análisis numéricos se considera un material ideal, libre de vacíos, imperfecciones y discontinuidades en su estructura cristalina, lo que en la realidad no es cierto.

Respecto al cumplimiento de la prueba, la norma NMX-D-136-CT-1988 [3], establece que los rines fabricados para uso en

automóviles de pasajeros no deben de presentar fractura en la prueba de fatiga dinámica flexionante antes de los 1 200 000 ciclos, por lo que se concluye que este rin de aleación es seguro, ya que la grieta se presentó hasta 1 511 088 ciclos.

6. Referencias

- [1] Forrest, P.G., *Fatiga de los metales*.
- [2] Kwai S. Chan, Peggy Jones, Qlgui Wang , «Fatigue crack growth and fracture paths in sand cast B319 and A356 aluminum alloys». *Materials Science and Engineering A341* (2003) 18-34.
- [3] NMX-D-136-CT-1988, Autotransporte –rines para llantas de automóviles y camiones ligeros– especificaciones y métodos de prueba.
- [4] *MSC Fatigue Theory MSC Fatigue Users Guide*

ESIME Zacatenco

La Coordinación del Piso de Pruebas
para Transformadores de los
Laboratorios Pesados II de Ingeniería Eléctrica
cuenta con pruebas acreditadas
que se encuentran al servicio de la industria nacional.

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

RESISTENCIA ÓHMICA

RIGIDEZ DIELECTRICA

TENSIÓN APLICADA

TENSIÓN INDUCIDA

ELEVACIÓN DE TEMPERATURA

IMPULSO

Tel. 5729 6000, ext. 54750
correo electrónico: piso_pruebas@hotmail.com