



ANÁLISIS DE FATIGA EN MUY ALTO NÚMERO DE CICLOS

FEDERICO CAVALIERI^{1,2}, CÉSAR LUENGO^{1,2}, ALBERTO CARDONA¹

¹Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería
CIMEC – INTEC / UNL – CONICET
Güemes 3450, Santa Fe, Argentina

²Facultad Regional Santa Fe – Universidad Tecnológica Nacional
Lavaisse 610, Santa Fe, Argentina

(Recibido 8 de febrero de 2011, para publicación 21 de marzo de 2011)

Resumen – Actualmente, muchos componentes mecánicos exigen vidas de servicio superiores a 10^8 ciclos. Esta situación ocurre por ejemplo en componentes de motores de combustión interna para uso vehicular (10^9 ciclos), en alabes de turbinas aeronáuticas o de generación de energía (10^{10} ciclos), entre otros. La teoría tradicional de fatiga admite la existencia de un límite de endurencia en la curva tensión vs. número de ciclos (S-N) por encima de 10^6 ciclos. Existen numerosos resultados experimentales sobre la resistencia a fatiga de diversos materiales en ese rango. Sin embargo, restricciones de tiempo y costo hacen que muy pocos datos se encuentren disponibles más allá de 10^7 ciclos, donde se predice el límite estándar de fatiga con aproximaciones estadísticas. Los sistemas de análisis de fatiga piezoeléctricos permiten estudiar el comportamiento a fatiga en muy alto número de ciclos en diferentes tipos de materiales, con costos y tiempos considerablemente más bajos comparados con las típicas máquinas servo-hidráulicas y de flexión rotativa, donde la frecuencia máxima de operación se encuentra en el orden de los 100 Hz. En este trabajo se describe un análisis a fatiga a elevada temperatura en tracción-compresión de un acero utilizando una máquina de ensayos ultrasónica con una frecuencia de operación de 20 kHz, bajo una relación de cargas de $R = -1$.

Palabras clave – Resistencia a fatiga, límite de endurencia, piezoeléctricos, máquina de ensayo ultrasónica.

1. INTRODUCCIÓN

Las normas actuales de diseño a fatiga de numerosos componentes de mecánicos exigen garantizar una vida útil de alrededor 10^8 ciclos sin que se produzca falla alguna. Por ejemplo, en motores diesel de automóviles, se requiere alcanzar una vida de 10^8 ciclos. Aún más exigente es el caso de las turbinas aeronáuticas, donde se necesita una vida de 10^{10} ciclos. Por lo tanto, es necesario extender el estudio a fatiga de materiales al rango giga cíclico, o como también es conocido en la literatura, a fatiga de muy alto número de ciclos.

A mediados de los años 80, investigadores japoneses establecieron que la mayoría de las aleaciones metálicas podrían fallar más allá de 10^7 ciclos. Recientemente, el fenómeno de fallas por fatiga en el rango giga cíclico de muchas aleaciones han sido establecidas por Bathias [1] y colaboradores (Kong, 1987 [2]; Ni, 1991 [3]; Thanigaiyarasu, 1988 [4]).

Tradicionalmente la curva S-N (tensión-ciclos) se asume como una función hiperbólica con un decaimiento asintótico de la resistencia a fatiga conforme aumenta el número de ciclos. Sin embargo, lo que han demostrado los estudios de fatiga en muy alto número de ciclos, es que no existe una asíntota horizontal, por lo menos para la mayoría de las aleaciones. Esto significa que, los mecanismos de iniciación de fallas a partir de 10^6 a 10^9 ciclos son un tópico de gran interés para los nuevos diseños mecánicos y estructurales.

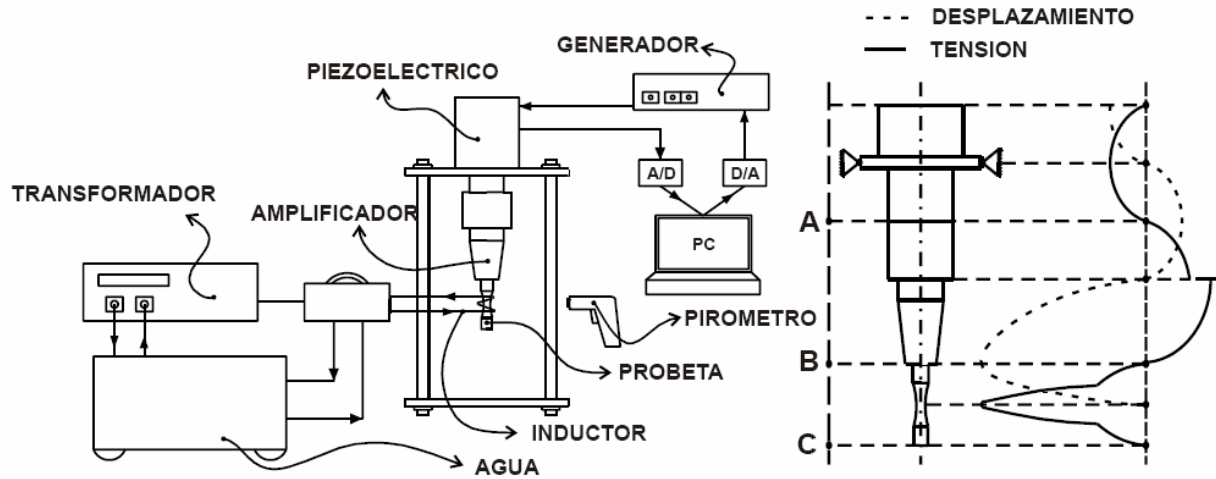


Fig. 1. Esquema para la máquina de fatiga ultrasónica.

Los ensayos de fatiga ultrasónicos difieren de los convencionales en que la frecuencia de operación para estos últimos está limitada a alrededor de los 100 Hz, en cambio, el rango de frecuencia con la cual trabaja una máquina de fatiga ultrasónica es de 15 kHz a 30 kHz, con un valor típico de 20 kHz. De esta manera, el tiempo requerido para alcanzar 10^7 ciclos se encuentra en el orden de los 9 minutos, mientras que con una máquina convencional de 100 Hz tomaría 12 días. Para ciclos más elevados, por ejemplo 10^9 ciclos (régimen giga cíclico), el método ultrasónico requiere de 14 horas, mientras que a 100 Hz más de tres años para tan sólo una probeta. Muchos estudios en esta área han sido reportados con ensayos a temperatura ambiente, sin embargo, la disponibilidad de información a elevada temperatura es muy escasa por el tiempo que insume alcanzar 10^9 ciclos con una máquina de fatiga tradicional.

En este trabajo se presenta una nueva metodología para el estudio del comportamiento de fatiga a elevada temperatura de un acero austenítico, muy utilizado en válvulas de motores de combustión interna, en tracción compresión, con un régimen de cargas de $R = -1$ y en el rango de 10^5 a 10^9 ciclos empleando una máquina de fatiga ultrasónica y simulación numérica. Dicha máquina tiene una frecuencia nominal de operación de 20 kHz. Numerosos trabajos han mostrado que los efectos de la frecuencia de operación no son determinantes en la calidad de los resultados (Mayer [5]).

Para llevar a cabo los ensayos con alta temperatura, se utilizó un equipo de inducción para obtener 700°C en la probeta.

Mediante el método de los elementos finitos (MEF) se llevaron a cabo simulaciones para la obtención del campo de tensiones y desplazamientos en la probeta. Finalmente, en la última sección, se presentan las curvas de tensión-número de ciclos a 700°C junto con sus comentarios y resultados obtenidos.

2. MÁQUINA DE ENSAYOS DE FATIGA ULTRASÓNICA

La primera máquina de fatiga ultrasónica fue introducida por Mason en 1950, con importantes avances de investigación en las últimas dos décadas. En el Instituto Tecnológico de Materiales Avanzados, ITMA de la Universidad Paris X [6], la técnica de ensayos de fatiga ultrasónica se utiliza en ensayos en tracción-compresión, torsión, altas - bajas temperaturas y desgaste [7]. Las máquinas de fatiga ultrasónica, están compuestas de tres componentes principales (Fig. 1): 1. Un generador eléctrico que convierte la tensión de red en un voltaje de señal sinusoidal de alta frecuencia. 2. Un transductor piezoeléctrico que transforma la señal eléctrica en una vibración mecánica de la misma frecuencia. 3. Un amplificador mecánico que amplifica la vibración proveniente del transductor para obtener la amplitud de la tensión requerida en la probeta.

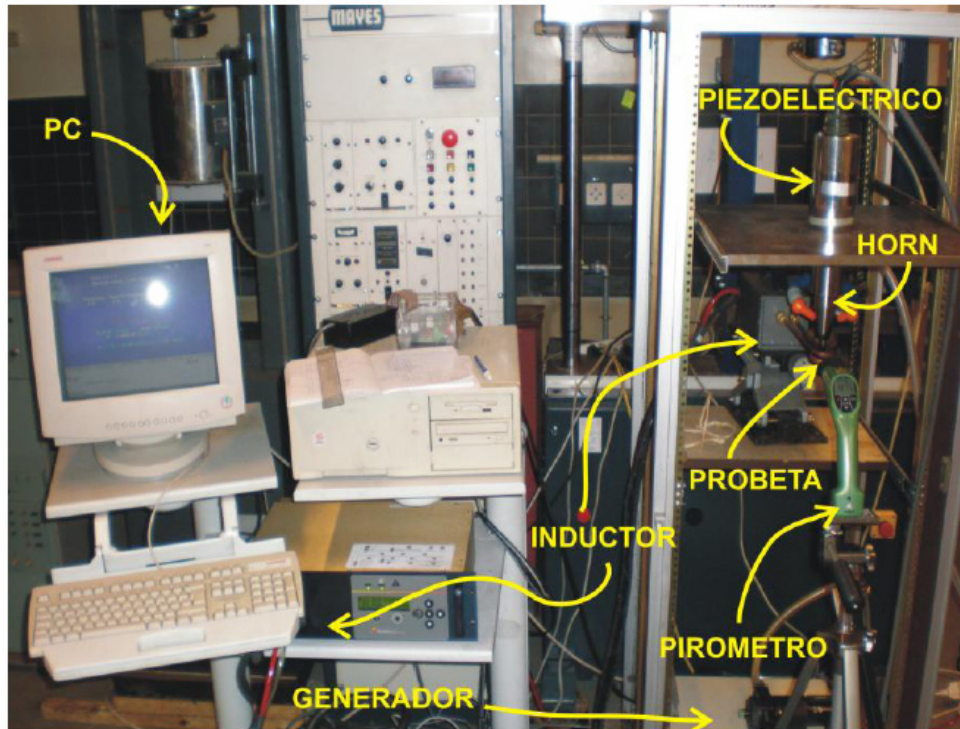


Fig. 2. Máquina de fatiga ultrasónica utilizada para los ensayos.

El generador se conecta a una PC y ésta a una placa de adquisición de datos A/D y D/A para controlar el generador y el piezoeléctrico. El movimiento de la máquina es inducido por el piezoeléctrico. El transductor genera una onda mecánica con una frecuencia natural de 20 kHz y por esta razón, la probeta debe ser diseñada con esta frecuencia en su primer modo de oscilación para que alcance un desplazamiento máximo (tensión nula) en los extremos y una tensión máxima (desplazamiento nulo) en la sección central.

Los resultados que se obtengan de esta máquina serán válidos a partir de los 10^5 ciclos aproximadamente, porque con valores más bajos, aparecen fenómenos de plasticidad y en ese caso correspondería realizar un estudio de fatiga de bajo número de ciclos en un equipo convencional. El rango de frecuencia operativa de esta máquina se encuentra entre 19.5 y 20.5 kHz y si ésta decrece por debajo de los 19.5 kHz o se incrementa por encima de los 20.5 kHz el ensayo se detiene automáticamente. La relación entre las tensiones y los desplazamientos es lineal, siendo únicamente necesaria la medición de la amplitud del desplazamiento para computar las tensiones. En contraste con los ensayos de fatiga de bajo número de ciclos, donde la máquina tiene una frecuencia natural de vibración diferente a la probeta, en los ensayos de fatiga ultrasónicos, la probeta y la máquina conforman un sistema resonante, en el cual la amplitud de los desplazamientos se mantiene constante durante el ensayo con un valor pre-seleccionado.

La máquina de fatiga ultrasónica (Fig. 2), se complementa con un equipo para calentar la probeta (inductor) y con los instrumentos de medición (pirómetro y termocuplas) para controlar la temperatura.

3. MATERIAL ENSAYADO

El material empleado para el análisis de fatiga fue el acero austenítico X50 CrMnNiNbN 21 9, utilizado en componentes mecánicos que se encuentran sujetos a fuertes gradientes térmicos. Los datos de la composición química se muestran en la Tabla 1, en tanto que los valores numéricos a temperatura ambiente de la densidad ρ , módulo estático de Young E , conductividad térmica k y el coeficiente de expansión térmica α se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1. Propiedades químicas del material H854.

Acero	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Nb	N
X50 CrMnNiNbN 21 9	0.53	0.25	9.5	21	3.8	1	2.2	0.5

Tabla 2. Propiedades termo-mecánicas del material H854.

Acero	ρ (g/cm ³)	E (N/mm ²)	UTS (N/mm ²)	K (W/m.K)	α (m/m.K)
X50 CrMnNiNbN 21 9	7.7	215×10^3	950 - 1150	14.5	18.8

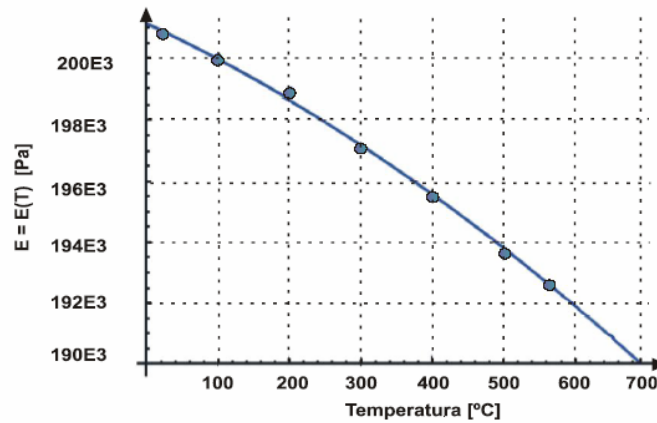


Fig. 3. Módulo de elasticidad del material en función de la temperatura.

El análisis metalográfico de la microestructura fue realizado con microscopios ópticos y de barrido electrónico SEM (*Scanning Electron Microscopy*). Por medio de estos instrumentos se pudo efectuar un minucioso análisis de las características metalúrgicas del material, esencial para un posterior estudio de los resultados experimentales de fatiga.

Para el diseño y cómputo de las tensiones y desplazamientos en una probeta sujeta a un régimen de cargas ultrasónicas y elevada temperatura, se requiere de una función que vincule el módulo de Young con la temperatura, esto es $E = E(T)$.

La variación del módulo de Young con la temperatura para el acero utilizado en este trabajo se muestra en la Fig. 3.

Mediante el ajuste de coeficientes de una función cuadrática, la relación $E=E(T)$ fue aproximada según la siguiente expresión:

$$E(T) = 2.01134 \times 10^{11} - 1.09468 \times 10^7 T - 7417.87 T^2 [Pa] \quad (1)$$

donde T está dada en °C.

4. MODELOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS PARA EL DISEÑO DE PROBETAS

El principio de fatiga ultrasónica puede ser explicado a través de un simple modelo matemático de dos masas vibrando, conectadas por medio de un resorte de rigidez k . La frecuencia de resonancia se expresa por:

$$f_{reso} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

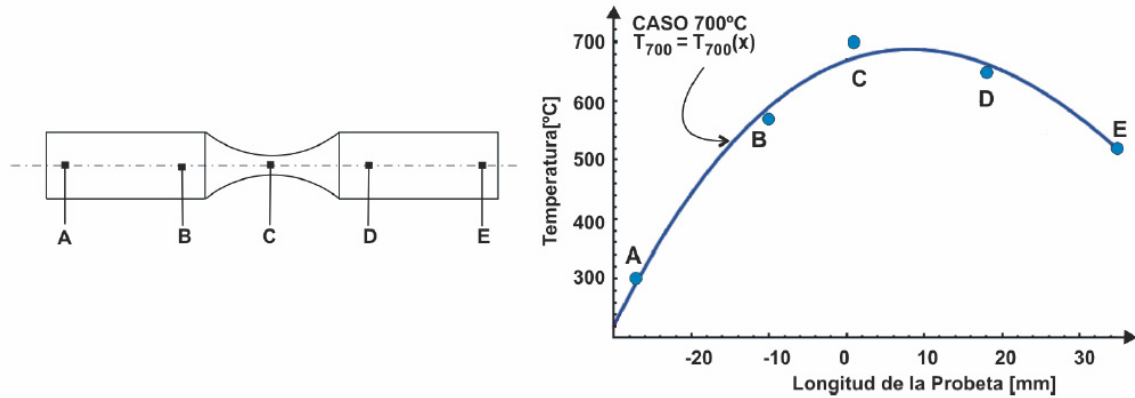


Fig. 4. Puntos de medición de temperaturas en la probeta.

Es importante señalar que en los extremos, donde se localizan las masas, los desplazamientos son máximos y en la mitad del resorte, el desplazamiento es nulo. Este sistema constituye un simple modelo discreto que nos da una primera idea conceptual acerca de la frecuencia de vibración en una probeta. No obstante, mediante un modelo continuo es posible obtener una mejor representación, por ejemplo, en el caso de una barra y despreciando la contracción transversal, la frecuencia natural de vibración se encuentra dada por:

$$f_{reso} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

donde E es el módulo de Young, ρ la densidad y L la longitud de la barra.

5. CAMPOS DE TENSIONES Y DESPLAZAMIENTOS PARA UNA PROBETA ULTRASÓNICA

5.1. Método semi-analítico

Cuando una probeta se somete a una carga térmica exterior, la frecuencia de resonancia es afectada por los cambios geométricos y por la disminución del módulo dinámico de Young.

Consecuentemente, la geometría de la probeta debe mantener una frecuencia de vibración a la temperatura deseada tan cerca como sea posible a los 20 kHz. Como resultado del calentamiento en la zona central de la probeta, el módulo de Young varía a lo largo de su longitud $E = E(x)$.

La distribución de temperatura se determinó experimentalmente utilizando un pirómetro óptico y termocuplas conectadas a una probeta cuyas dimensiones no eran las definitivas para los ensayos a elevada temperatura. Las mediciones experimentales de temperatura fueron registradas, como se muestra en la Fig. 4, en los puntos: A, B, C, D y E. Finalmente, por un ajuste de datos, la temperatura en función de la posición fue aproximada mediante:

$$T_{700}(x) = 660 + 5.70727x - 0.289x^2 [^{\circ}\text{C}] \quad (4)$$

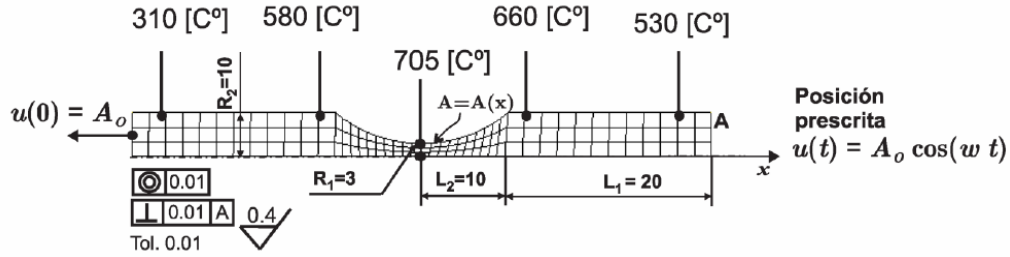


Fig. 5. Topología de malla, condiciones de borde y propiedades termomecánicas del modelo de elementos finitos.

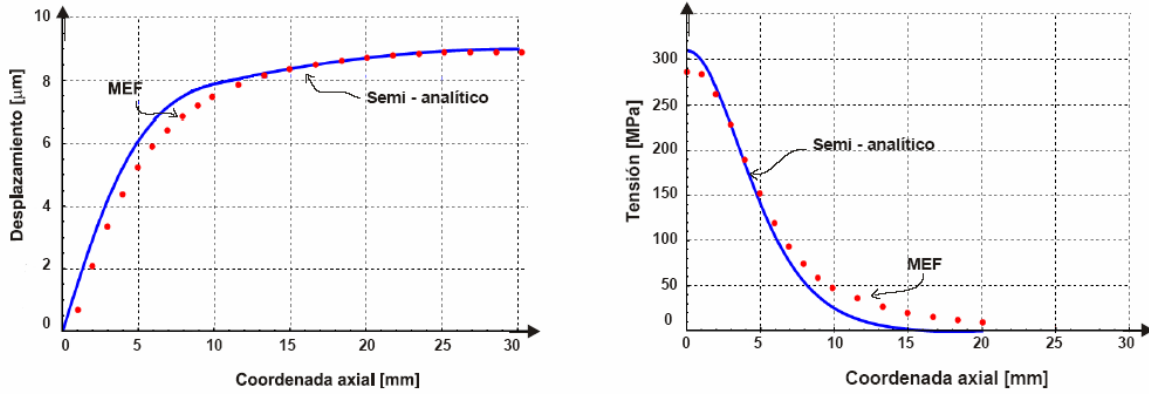


Fig. 6. Comparación de los desplazamientos y tensiones para alta temperatura, 700°C utilizando un método semianalítico y el MEF.

Donde la coordenada longitudinal x está dada en mm. Utilizando la ecuación (4) y el módulo de Young en función de la temperatura, ver ecuación (1), la variación del módulo de Young a lo largo de la longitud de la probeta, $E = E[T(x)]$, puede ser establecida en todos los puntos. Soluciones de los campos de desplazamientos y tensiones para una probeta no cilíndrica (Fig. 4), se obtienen resolviendo iterativamente la siguiente ecuación diferencial,

$$\begin{cases} U''(x) + U'(x) \left[\frac{A'(x)}{A(x)} + \frac{E'(x)}{E(x)} \right] + \frac{\omega^2 \rho}{E(x)} U(x) = 0 \\ U(L) = 0 \\ U(x) = A_0 \end{cases} \quad (5)$$

Donde, $U(x)$ es la amplitud de la vibración en cada punto de la probeta a lo largo de la coordenada longitudinal x ; el símbolo ($'$) representa d/dx ; $A(x)$ es la sección transversal de la probeta, ρ es la densidad del material y $\omega = 2\pi 20.000$ es la frecuencia angular. A_0 es un desplazamiento impuesto en un extremo de la probeta. Por los requerimientos experimentales, la geometría de la probeta debería ser tal que la deformación sea cero en un extremo, por ejemplo: $U'(L) = 0$.

Para conocer la influencia del módulo de Poisson en el resultado de las tensiones y desplazamientos; no tenido en cuenta en la ecuación (5); se realizó un análisis por simulación a través de MEF.

5.2. Análisis mediante el MEF

Un análisis termomecánico fue llevado a cabo con las propiedades del material que se muestran en la Tabla 2. El módulo de Young fue introducido en el modelo de elementos finitos como función de la temperatura, ver ecuación (1). La Fig. 5 muestra la geometría y características de mecanizado de la probeta

utilizada en los ensayos junto con la malla del modelo de elementos finitos y condiciones de borde para una de temperatura 700°C.

Los resultados del MEF fueron obtenidos por medio de un análisis transitorio donde un desplazamiento variable en el tiempo $u(t) = A_0 \cos(\omega t)$ fue impuesto en un extremo de la probeta con $\omega = 2\pi 20.000$, mientras que el extremo opuesto se dejó libre, ver Fig. 5. El tiempo de integración fue el necesario para alcanzar una condición de respuesta armónica.

La comparación de los desplazamientos y tensiones entre el modelo de elementos finitos y el método semi-analítico se muestra en la Fig. 6. Los resultados de tensiones para ambos métodos muestran una buena correlación en el centro de la probeta, sector de mayor interés para construir las curvas de fatiga S-N.

La diferencia entre las soluciones de ambos métodos se debe a los efectos del módulo de Poisson.

6. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LOS ENSAYOS DE FATIGA

Para los ensayos a elevada temperatura se utilizó un equipo de inducción. El inductor, diseñado en forma de espiral (según Curtis [8]), fue construido en cobre y situado en torno al centro de la probeta, con el objetivo de alcanzar la temperatura deseada alrededor de la zona media. Un pirómetro óptico y termocuplas fueron los instrumentos de medición utilizados en los ensayos para medir y controlar la temperatura. Empleando termocuplas se pudo calibrar el pirómetro óptico como así también medir la temperatura durante los ensayos. Sin embargo, el pirómetro presenta ventajas prácticas comparado con las termocuplas, ya que no requiere soldaduras de ningún tipo a la probeta y además permite realizar mediciones en diferentes puntos de una manera muy sencilla.

Una calibración de la máquina de ensayos de fatiga ultrasónica fue requerida para hacer que el sistema vibre con una frecuencia de resonancia en torno a los 20 kHz. Este procedimiento se realizó con una probeta cilíndrica y un sensor láser que registra desplazamientos en el rango de 1 μm a 199.9 μm con una resolución de 0.1 μm .

El sistema mecánico trabaja en el régimen elástico y, por consiguiente, la relación entre los desplazamientos, deformaciones y tensiones es lineal. En la máquina utilizada en este trabajo, el voltaje eléctrico es también lineal y proporcional a los desplazamientos. La Fig. 7 muestra un registro de la amplitud de los desplazamientos en un extremo de la probeta medido con un sensor óptico en función del voltaje de entrada. El factor que vincula la amplitud del voltaje de entrada y la amplitud de los desplazamientos en la probeta (la constante A_0 en la ecuación (5)), se obtiene a partir de estas mediciones.

Las probetas que no fallaron hasta 10^9 ciclos fueron consideradas sin daño por fatiga. Luego, fueron ensayadas nuevamente con un incremento de tensión. Este procedimiento fue repetido hasta que se alcanzara la rotura. Según la investigación de Marines [9], la resistencia a fatiga en alto número de ciclos es muy sensible a la terminación superficial de la probeta, dado que la rugosidad podría generar una pequeña concentración de tensiones contribuyendo a acelerar el daño por fatiga. Por tal motivo, las probetas fueron pulidas para reducir la dispersión tanto como sea posible en los gráficos S-N.

La geometría y la frecuencia de resonancia de las probetas fueron verificadas antes de cada ensayo y una tolerancia de +/- 200 Hz fue establecida como el máximo rango de variación. Finalmente, las curvas S-N obtenidas se muestran en la sección 7. En cada probeta ensayada se determinó el tipo de inicio de fisura: superficial, sub-superficial, internas o combinación de ellas, y si fueron iniciadas por inclusiones no metálicas.

7. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

La curva S-N del material ensayado a 700°C se presenta en la Fig. 8.

Para las probetas ensayadas la iniciación de la fisura se localizó en la superficie y no se encontraron roturas originadas por inclusiones o defectos internos.

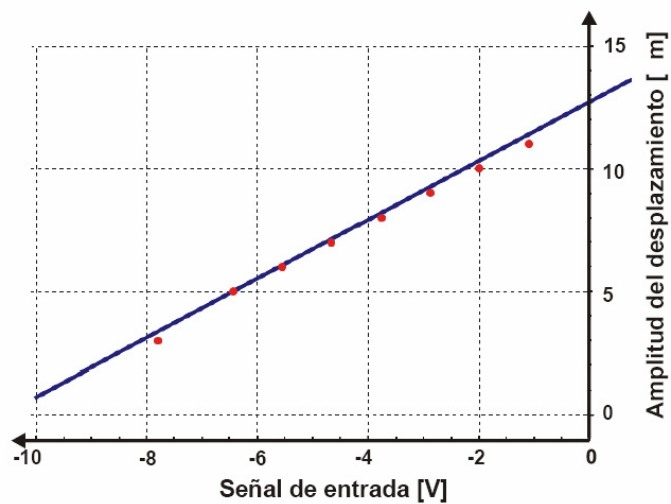


Fig. 7. Amplitud de desplazamientos en el extremo de la probeta.

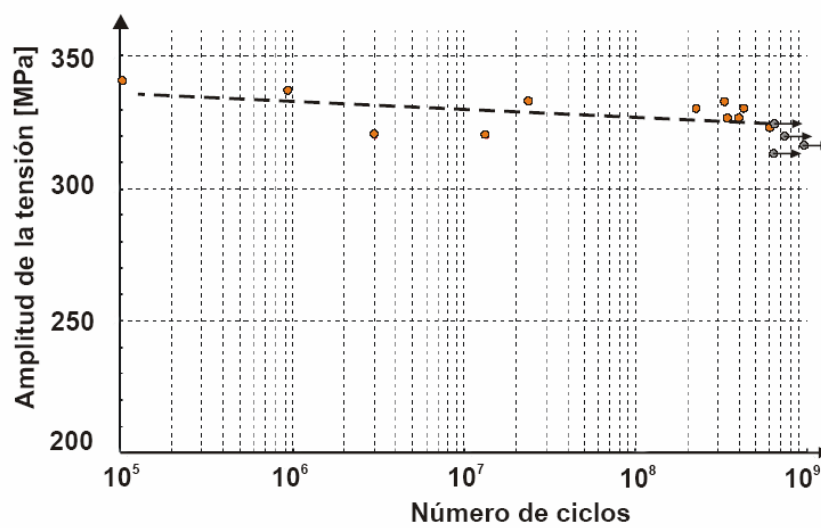
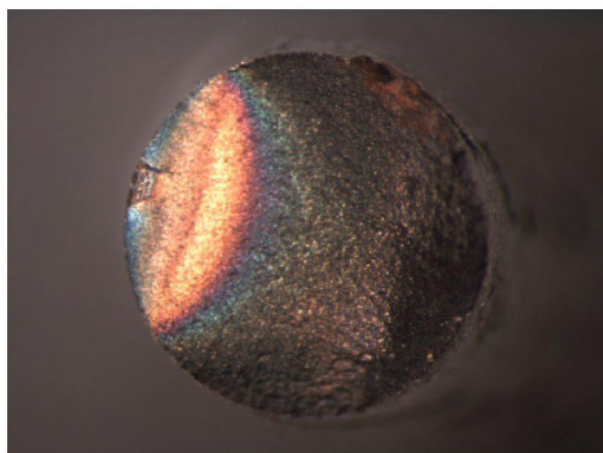


Fig. 8. Curva S-N a 700°C.

Fig. 9. Rotura de una probeta a 345 MPa y 3×10^8 ciclos.

La Fig. 9, obtenida utilizando un microscopio óptico, muestra la superficie de fractura en una probeta que falló a 345 MPa y 3×10^8 ciclos. La fractura final se localizó en el medio de la probeta con una inclinación de 40° respecto del eje longitudinal.

La curva S-N de la Fig. 8 muestra un leve descenso de la respuesta tensión versus número de ciclos. Se observó oxidación en las probetas ensayadas a 700°C .

8. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado el fenómeno de fatiga ultrasónica en un acero austenítico sometido a esfuerzos de tracción-compresión en un rango de 10^5 a 10^9 ciclos por medio de técnicas experimentales, teóricas y numéricas a través del MEF. Una máquina ultrasónica con una frecuencia de funcionamiento de 20 kHz, fue empleada para analizar el comportamiento a fatiga del material a elevada temperatura con el objetivo de obtener la curva de tensión versus número de ciclos en el régimen gigacíclico, lo que permite determinar si el material posee un límite de endurance.

Las conclusiones más importantes se describen a continuación:

1. Cuando la probeta alcanzaba la temperatura deseada, la frecuencia de resonancia estuvo cercana a los 20 kHz durante los ensayos.
2. La curva para 700°C mostró una continua disminución de la respuesta tensión vs. número de ciclos. La iniciación de la fisura fue identificada en la superficie.
3. Los resultados obtenidos en este trabajo podrían ser utilizados para generar nuevos diseños de componentes mecánicos desde el punto de vista de fatiga, por ejemplo componentes para motores de automóviles.

REFERENCIAS

- [1] Bathias, C., "Piezoelectric fatigue testing machine and devices", *International Journal of Fatigue*, **28**(11), 1438-1445 (2006)
- [2] Kong, X., "Theoretical and numerical study on vibratory fatigue", Thèse de doctorat, University of Technology of Compiègne (1987)
- [3] Ni, J., "Mechanical behaviour of alloys in ultrasonic fatigue", Thèse de doctorat, CNAM (1991)
- [4] Thanigaiyarasu, G., "Contribution to the study of fatigue life and crack growth in vibration fatigue", Thèse de doctorat, University of Technology of Compiègne (1991)
- [5] Mayer, H., "Fatigue crack growth and threshold measurements at very high frequencies", *International Material*, **4**(1), 1-34 (1999)
- [6] Université Paris X, *LEEE/ITMA*, <http://www.cva.u-paris10.fr/iut> (2010)
- [7] Sun, Z.D., Bathias, C., Baudry, G., "Fretting fatigue of 42CrMo4 steel at ultrasonic frequency", *International Journal of Fatigue*, **23**(5), 449-453 (2001)
- [8] Curtis, F.W., *High Frequency Induction Heating*, McGraw-Hill (1950)
- [9] Marines, I., Dominguez, G., Baudry, G., Vittori, J.F., Rathery, S., Doucet, J.P., Bathias, C., "Ultrasonic fatigue tests on bearing steel AISI-SAE 52100 at frequency of 20 and 30 kHz", *International Journal of Fatigue*, **25**(9), 1037-1046 (2003)

FATIGUE ANALYSIS AT HIGH CYCLES NUMBERS

Abstract – Nowadays, many mechanical components require an operative life beyond 10^8 cycles. This situation occurs in internal combustion engine valves (10^9 cycles), blades of aeronautical turbines or of electric generation (10^{10} cycles), among others. The classical fatigue theory assumes an endurance limit in the stress vs. number of cycles curve beyond 10^6 cycles. There are numerous experimental works about the fatigue strength until

this limit. However, few results are available beyond 10^7 cycles due to the high costs and time consuming in classical fatigue test machines. In this case, the endurance limit is predicted with statistical approaches. The ultrasonic fatigue testing machine allows obtaining fatigue results at high cycle numbers for different kind of materials with shorter time and lower costs compared to traditional hydraulic or rotative bending fatigue machines, where the maximum operative frequency is about 100 Hz. In this work, we present a fatigue analysis at high temperature in traction-compression ($R = -1$) in an austenitic steel using an ultrasonic fatigue testing machine with an operative frequency of 20 kHz.

Keywords – Fatigue strength, Endurance limit, Piezoelectric, Ultrasonic fatigue machine.