

DETERMINACIÓN DEL FALLO POR FATIGA EN BASE A CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS DE COMPONENTES DE PA 6.6 REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO

I. Carrascal, J. A. Casado, J. M^a Varona, J. A. Polanco y F. Gutiérrez-Solana

Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y los Materiales.
Universidad de Cantabria. Avda. los Castros, s/n. 39005-Santander, España

Resumen. Entre los elementos que el tren de alta velocidad española emplea en el sistema de sujeción del carril a la traviesa se encuentran varios componentes estructurales fabricados con materiales compuestos de matriz termoplástica, PA 6.6, y reforzados con fibra corta de vidrio. Estos componentes se encuentran sometidos continuamente a esfuerzos dinámicos de naturaleza cíclica como consecuencia del paso de las ruedas del tren. Para la caracterización ante este tipo de esfuerzos, en estudios previos se ha analizado la adaptación del método Locati a este tipo de materiales, lo que supone un ahorro importante de tiempo y probetas a ensayar. El método Locati consiste en la aplicación de bloques de un número de ciclos determinado bajo un nivel de esfuerzo constante que se irá incrementando paulatinamente al ir superando cada uno de los escalones. A medida que se aumenta la carga, llegará un momento en el que se alcanza el fallo por fatiga. Este nivel de esfuerzo, no coincide con el límite de fatiga del material, por lo cual la dificultad del método radica en la búsqueda de la correlación entre dicho parámetro y los resultados aportados por el ensayo. En este trabajo se propone un modelo para la identificación de las condiciones críticas a través de un estudio de la evolución de varios parámetros entre los que se encuentran la energía almacenada y disipada en cada uno de los ciclos de carga, así como del desfase entre las señales de carga y deformación. Estos parámetros comentados, actuarán como indicadores de la situación en la que la temperatura del material, como consecuencia del calor generado internamente por efecto de la carga repetitiva, alcanza valores similares a los de la temperatura de transición del material, momento a partir del cual el material comienza a adquirir deformaciones crecientes que desembocan en un fallo por fatiga.

Abstract. Among the elements used by the Spanish High, Speed Train in the system for fastening the rail to the sleeper, there are several structural components manufactured with materials composed of a thermoplastic matrix, PA 6.6, reinforced with short fibre-glass. These components are continuously subjected to dynamic strains of a cyclical nature due to the passing of the train wheels. Previous works have, for the characterisation of this type of strains, used an adaptation of the Locati method to this type of materials, leading to an important saving in time and in specimens to be tested. The Locati method consists in the application of blocks of a specific number of cycles under a constant level of strain which is gradually increased as each of the steps are surpassed. As the load increases, the moment will be reached when the fatigue failure is produced. This level of strain does not coincide with the fatigue limit of the material, so the difficulty of the method lies in the search for the correlation between this parameter and the results provided by the test. This paper propose a model for the identification of the critical conditions by means of a study of the evolution of various parameters, including the stored and dissipated energy in each of the loading cycles, and the desphase between the load signals and deformation. This parameters will acts as gauges of the situation in which the temperature of the material will, as a consequence of the heat generated internally by the repeated load, reach values similar to those of the material transition temperature. From this moment on, the material will begin to require increasing deformation leading to fatigue failure.

1. INTRODUCCIÓN

El sistema de sujeción de los carriles a la traviesa empleado por el ferrocarril de alta velocidad española (AVE) en la nueva línea Madrid-Barcelona está formado, entre otros, por tres componentes de naturaleza polimérica, debido a necesidades de aislamiento eléctrico y amortiguamiento mecánico del sistema. Este tipo de materiales presentan una respuesta mecánica ante los esfuerzos dinámicos recibidos como consecuencia del paso cíclico de las ruedas de los vehículos mucho menor que el resto de los componentes del sistema de sujeción, normalmente metálicos,

convirtiéndose, de esta manera en una especie de fusible mecánico del sistema. Por tanto se hace necesario conocer la resistencia de este tipo de componentes bajo estas condiciones de sollicitación. Los métodos tradicionales de caracterización en fatiga exigen la realización de un gran número de pruebas que alargan en el tiempo la obtención de resultados, así como el empleo de un elevado número de probetas.

La utilización de métodos de caracterización acelerada permiten reducir los tiempos de ensayo y el número de probetas empleadas. En este trabajo se presenta una metodología basada en la determinación de las energías

tanto disipada como almacenada, así como, del ángulo de desfase entre la señal de fuerza y la de desplazamiento en cada uno de los ciclos de carga aplicados conforme establece el método LOCATI de caracterización acelerada en fatiga.

2. COMPONENTE OBJETO DE ENSAYO

Se ha elegido para desarrollar este trabajo uno de los componentes poliméricos que forman parte del conjunto de sujeción del AVE, concretamente la placa acodada de guía A2. En la Figura 1 se muestra su geometría nervada, así como su posición de trabajo, sujeta contra la traviesa por medio de un clip metálico y un tornillo, y recibiendo los esfuerzos horizontales transmitidos por el patín del carril debido a los sucesivos pasos de las ruedas de los trenes. La placa A2 está inyectada en Poliamida 6.6 reforzada con un 35% de fibra corta de vidrio. Debido a la naturaleza altamente higroscópica de la Poliamida 6.6, y la gran influencia que sobre el comportamiento mecánico puede ocasionar la absorción de agua, las placas empleadas fueron dotadas de una humedad cercana a la de equilibrio, en torno al 1.6 % en peso.

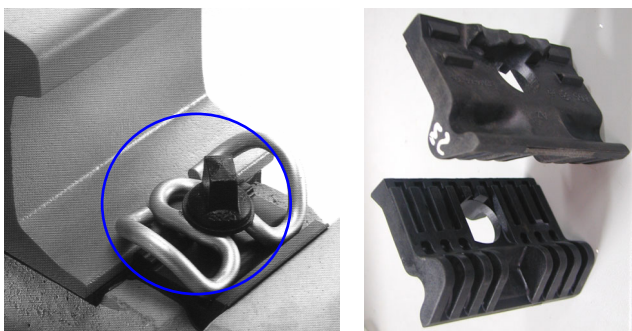


Fig. 1. Componente objeto de ensayo. Montaje en el conjunto de la sujeción y geometría.

3. METODOLOGÍA

Para la caracterización acelerada en fatiga se empleó la técnica del ensayo LOCATI [1, 2]. Con este ensayo se pretende determinar el valor de la carga que provoca el fallo por fatiga con un único ensayo. El método consiste en aplicar una fuerza máxima escalonada y creciente, a partir de un valor inferior al límite de fatiga, durante un número constante de ciclos.

Se aplicaron bloques de 40.000 ciclos de onda senoidales a una frecuencia de 5 Hz, entre valores de carga de compresión iniciales de 5 y 45 kN. El valor mínimo se conservó en todos los bloques mientras que el valor máximo se incrementaba 2 kN en cada bloque. Los parámetros empleados se resumen en la Tabla 1.

El dispositivo empleado para la realización del ensayo simula perfectamente las condiciones reales de trabajo del componente, como se puede observar en la Figura 2.

Tabla 1.- Parámetros empleados en el ensayo Locati

nº	N (ciclos)	F _{máx} (kN)	F _{mín} (kN)	F _m (kN)	F ₀ (kN)
1	[1 - 40.000]	45	5	25	20
2	[40.000 - 80.000]	47	5	26	21
3	[80.000 - 120.000]	49	5	27	22
4	[120.000 - 160.000]	51	5	28	23
5	[160.000 - 200.000]	53	5	29	24
6	[200.000 - 240.000]	55	5	30	25
7	[240.000 - 280.000]	57	5	31	26
8	[280.000 - 320.000]	59	5	32	27



Fig. 2. Utillaje empleado para el ensayo de la placa.

En los ensayos LOCATI realizados se registraron datos de ondas completas cada 1000 ciclos, almacenándose 50 puntos por onda de carga y de desplazamiento relativo entre el simulador del patín del carril y el asiento de la placa. También se registro de forma continua la evolución de la temperatura alcanzada por la placa por medio de un termopar colocado entre dos de los nervios por la parte interior de la misma.

A un cierto nivel de carga, aparece un escalón ó nivel crítico a partir del cual los valores de la deformación pierden su estabilidad y crecen con una velocidad crítica que precede a la rotura de la placa. De este modo, es posible establecer un nivel de variación de fuerza crítico equivalente al valor de la resistencia a la fatiga de la placa.

Para la búsqueda de este escalón crítico, en trabajos previos, se recurrió al estudio de la deformación de la placa [3], ó a la variación de las deformaciones máximas frente al nº de ciclos, es decir al estudio de la derivada de la deformación máxima [4], considerando como escalón crítico aquél en el que no se recupere la derivada de la deformación máxima en su totalidad. Por tratarse de materiales de matriz termoplástica, la temperatura será otro parámetro importante a controlar y del cual obtener información en el momento de producirse el fallo.

4. SOPORTE TEÓRICO

Cuando se realiza un análisis dinamo-mecánico (DMA) sobre un material, trabajando siempre en régimen viscoelástico, al representar la evolución de la tangente del ángulo de desfase entre las señales de tensión y deformación frente a la temperatura adquirida por el material pueden aparecer uno o varios picos, que se corresponden con transiciones o relajaciones viscoelásticas. El pico más destacado de todos ellos se asocia con el movimiento molecular general provocado a la temperatura de transición vítrea, T_g [5]. Como se puede observar en la Figura 3, esta temperatura coincide con un decremento brusco en la rigidez del sistema. El gráfico representado en dicha Figura corresponde a un análisis dinamo-mecánico macroscópico (DMA-M) [6] realizado sobre una placa A2 con una humedad similar a la de las placas empleadas en este trabajo y se puede comprobar que la T_g está situada ligeramente por debajo de los 40 °C.

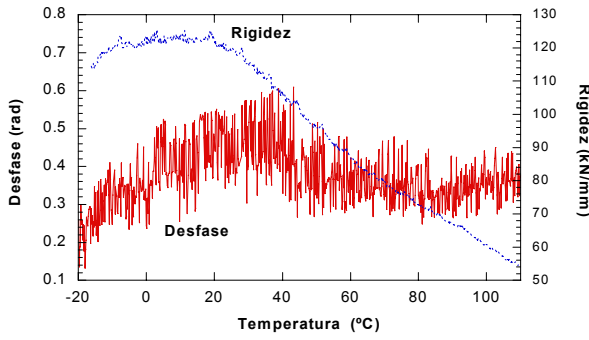


Fig. 3.- DMA-M sobre placa A2 [5]

Se realizará un análisis similar al anterior pero sustituyendo la temperatura aportada por una fuente externa por la generada internamente por el componente por efecto de la carga cíclica.

Como se observa en la Figura 3, la medida del ángulo de desfase se obtiene con una resolución baja, por lo que también se buscarán otros parámetros energéticos correlacionados con éste para tratar de mejorar la misma.

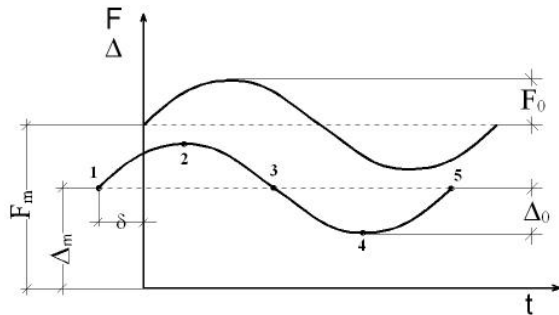


Fig. 4.- Desfase entre carga y desplazamiento

Los ensayos de fatiga LOCATI se realizaron en control de carga aplicando un esfuerzo sinusoidal de amplitud F_0 en torno a un nivel medio F_m , obteniéndose una respuesta similar para el desplazamiento pero desfasada

un ángulo δ y con amplitud Δ_0 y nivel medio Δ_m , ecuaciones (1) y (2) y Figura 4 [7].

$$F = F_m + F_0 \text{sen} \omega t \quad (1)$$

$$\Delta = \Delta_m + \Delta_0 \text{sen}(\omega t - \delta) \quad (2)$$

$$\Delta = \Delta_m + \Delta_0 (\cos \delta \text{sen} \omega t - \text{sen} \delta \cos \omega t) \quad (3)$$

Se podría obtener la energía disponible a lo largo de un ciclo a partir de la siguiente expresión:

$$dE = F d\Delta = F \frac{d\Delta}{dt} dt = F \dot{\Delta} dt \quad (4)$$

donde:

$$\dot{\Delta} = \frac{d\Delta}{dt} = \Delta_0 \omega (\cos \delta \cos \omega t + \text{sen} \delta \text{sen} \omega t)$$

y por tanto, (4) se podría expresar como:

$$dE = \Delta_0 \omega (F_m + F_0 \text{sen} \omega t) (\cos \delta \cos \omega t + \text{sen} \delta \text{sen} \omega t) dt$$

La energía disponible dentro de un ciclo entre dos instantes de tiempo t_1 y t_2 se obtiene integrando (4) entre dicho intervalo:

$$E_{t_1/t_2} = \int_{t_1}^{t_2} dE \quad (5)$$

$$E_{t_1/t_2} = \Delta_0 \omega \left(F_m \left(\cos \delta \int_{t_1}^{t_2} \cos \omega t dt + \text{sen} \delta \int_{t_1}^{t_2} \text{sen} \omega t dt \right) + F_0 \left(\cos \delta \int_{t_1}^{t_2} \text{sen} \omega t \cos \omega t dt + \text{sen} \delta \int_{t_1}^{t_2} \text{sen}^2 \omega t dt \right) \right)$$

$$E_{t_1/t_2} = \Delta_0 \left(F_m \left(\cos \delta \text{sen} \omega t \Big|_{t_1}^{t_2} - \text{sen} \delta \cos \omega t \Big|_{t_1}^{t_2} \right) + \frac{F_0}{2} \left(\cos \delta \text{sen}^2 \omega t \Big|_{t_1}^{t_2} + \omega \text{sen} \delta \left(t - \frac{\text{sen} 2\omega t}{2\omega} \right) \Big|_{t_1}^{t_2} \right) \right)$$

Esta energía total puede descomponerse, tal como se ve en la Figura 5, en energía disipada, representada por el bucle de histéresis y energía almacenada recuperada por la placa tras finalizar el ciclo.

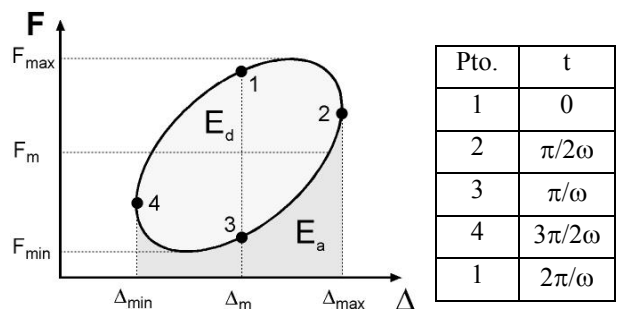


Fig. 5.- Energía almacenada y disipada

La energía disipada por ciclo se puede obtener como el área encerrada por el bucle (6), es decir, la integral de (4) en un período completo.

$$E_d = \oint dE = \int_0^{2\pi} \frac{2\pi}{\omega} dE = \pi F_0 \Delta_0 \text{sen} \delta \quad (6)$$

Mientras que la energía almacenada correspondería al área encerrada bajo el bucle, o lo que es lo mismo, la integral cambiada de signo entre los puntos 2 y 4 (7).

$$E_a = (-1) \int_{\frac{2\pi}{\omega}}^{\frac{3\pi}{2\omega}} dE = 2F_m \Delta_0 \cos \delta - \frac{\pi}{2} F_0 \Delta_0 \text{sen} \delta \quad (7)$$

Dividiendo la ecuación (6) por la (7) se llega a una expresión que correlaciona el ángulo de desfase con el cociente entre la energía disipada y la almacenada (8).

$$\text{tg} \delta = \frac{4F_m \frac{E_d}{E_a}}{\pi F_0 \left(2 + \frac{E_d}{E_a} \right)} \quad (8)$$

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el gráfico de la Figura 6 se representa la evolución de los parámetros medidos a lo largo del ensayo LOCATI, comprobando que, a partir de un cierto nivel de carga, los parámetros no se estabilizan dentro del propio escalón, creciendo hasta provocar el fallo del componente por fatiga. En este mismo diagrama se aprecia la dificultad existente a la hora de definir cual de todos los niveles corresponde al crítico.

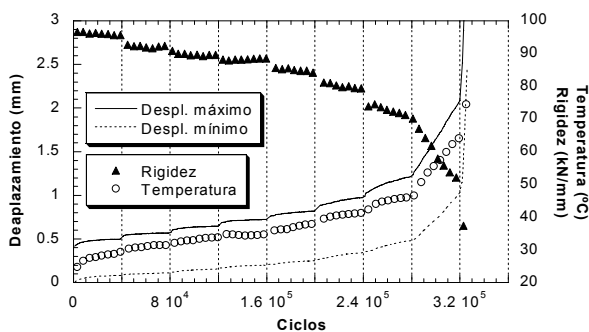


Fig. 6.- Ensayo LOCATI (Desplazamientos, rigidez y Temperatura frente al nº de ciclos)

Para precisar la definición de este escalón crítico, se procede al cálculo de las energías disipadas y almacenadas por ciclo en base a la determinación de las áreas del bucle de histéresis en un diagrama fuerza-desplazamiento y al área encerrada bajo este bucle, respectivamente, tal como se indica en la Figura 5.

En la Figura 7 se representa el cociente entre la energía disipada y la almacenada (E_d/E_a) frente a la T^a , comprobando que existe una correlación entre este

parámetro y el ángulo de desfase como se demostró en la expresión (8). En esta misma figura también se puede intuir que para una determinada temperatura los dos parámetros reflejados en el diagrama presentan un primer pico significativo, que coincide precisamente con la temperatura de transición obtenida en el ensayo dinamo-mecánico macroscópico (DMA-M). Este pico significativo coincide con el obtenido con probetas del mismo material ensayadas en fatiga a la tracción [4].

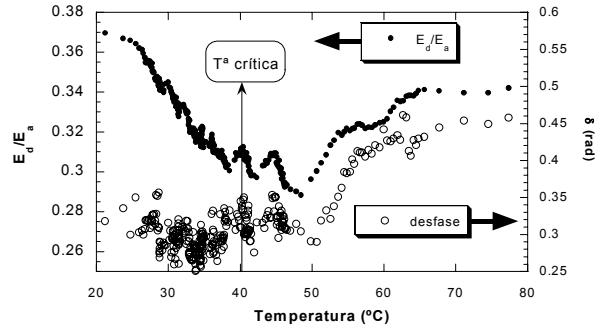


Fig. 7.- Desfase y relación de energías frente a T^a

Para confirmar este valor de temperatura crítica, se realizaron otros tres ensayos más, uno de ellos repitiendo los mismos parámetros, y otros dos reduciendo el número de ciclos por escalón a la mitad, (20.000 ciclos). Los resultados se reflejan en el gráfico de la Figura 8 confirmando que, en todos los casos, incluso reduciendo el tiempo de ensayo a la mitad el valor obtenido para la temperatura crítica osciló en torno a los 40 °C.

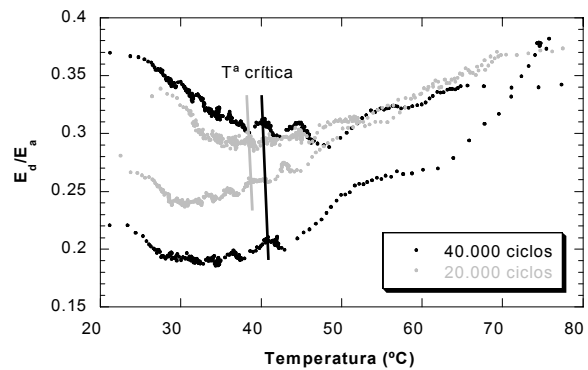


Fig. 8.- Definición de la T^a crítica

Una vez confirmada la temperatura crítica, para obtener el valor de nivel de carga crítica, se recurre al gráfico representado en la Figura 9 donde se representa la temperatura frente al número de ciclos, y se busca el número de ciclos para el que se alcanzó el valor de temperatura crítica, determinando el valor de la carga aplicada en ese escalón crítico.

En la citada Figura 9 se representan dos de los ensayos LOCATI realizados, uno con niveles de 40.000 ciclos y el otro con niveles de 20.000 ciclos, comprobándose que en ambos casos la temperatura crítica se consigue en el 6º escalón de carga, es decir, $F_{\text{max}} = 55$ kN.

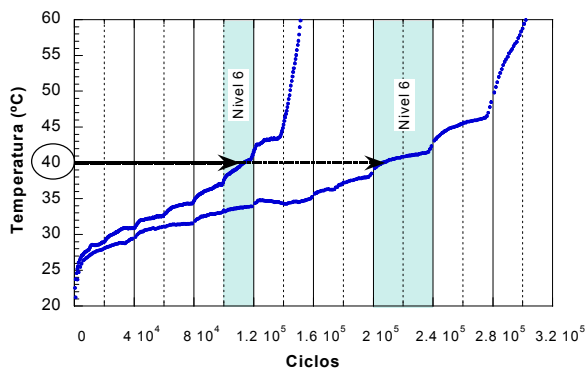


Fig. 9.- Definición del nivel crítico

Obtenido el nivel de carga crítica, se determina que el límite de fatiga corresponde al escalón inmediatamente inferior. Para comprobarlo se han realizado ensayos de fatiga convencionales con variaciones de carga constantes correspondientes a los tres niveles implicados: el crítico, el superior y el inferior.

Por tanto, se realizaron ensayos de fatiga monótona aplicando una carga máxima de 53, 55 y 57 kN, manteniendo en todos ellos 5 kN de carga mínima. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 10, donde se representan, en cada caso, las variables de desplazamiento máximo y temperatura alcanzada por la piezas ensayadas.

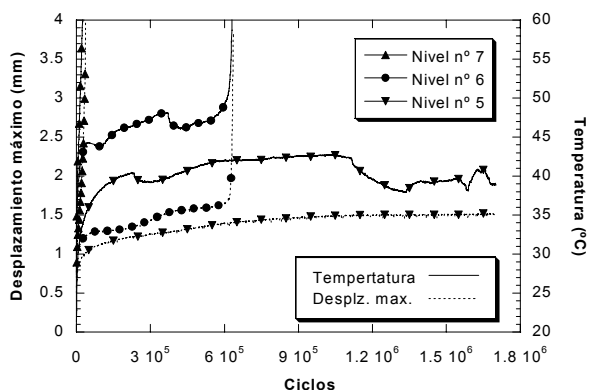


Fig. 10.- Ensayos de fatiga monótona

La placa ensayada con el nivel del escalón 5 superó $1.7 \cdot 10^6$ ciclos sin rotura y con una temperatura sensiblemente estabilizada en torno a la T_g (40 °C), por lo que se define el límite de fatiga como la carga correspondiente al nivel inferior al crítico, es decir, 53 kN.

Se puede observar que para el nivel crítico y el superior, la temperatura supera rápidamente el valor de T_g y que, al contrario de lo que sucede también a estos niveles, los valores de desplazamiento se estabilizan en el nivel 5, convirtiéndose el desplazamiento máximo en una recta prácticamente horizontal a partir del millón de ciclos. La carga del nivel 7 rompe la probeta por debajo de los 40.000 ciclos, siendo la temperatura y el desplazamiento variables crecientes hasta rotura. En el

nivel 6 la probeta mantiene estas variables hasta cerca de los 600.000 ciclos soportados en rotura, estando la temperatura, como ya se comentó, sensiblemente por encima de la T_g .

6. CONCLUSIONES

Se presenta en este trabajo un modelo para la determinación del fallo por fatiga analizando el parámetro que relaciona a las energías disipadas y almacenadas por ciclo (E_d/E_a) a partir de los resultados obtenidos en un ensayo de caracterización acelerada empleando el método LOCATI para componentes de materiales compuestos de matriz termoplástico de poliamida 6.6.

Al representar la variación de E_d/E_a frente a la temperatura, aparece un primer pico significativo para una temperatura muy próxima a la T_g del componente, obtenida en un ensayo DMA-Macroscópico. Esta temperatura define el nivel de carga crítica para el cual se produce el fallo. El valor del límite de fatiga del componente se corresponde al nivel de carga inmediatamente inferior al escalón crítico.

También se ha comprobado que los resultados son similares empleando bloques de 20.000 ciclos en lugar de 40.000, con lo que se consigue reducir el tiempo empleado en el ensayo de fatiga acelerado a la mitad.

7. REFERENCIAS

- [1] Locati, L. La Fatica dei Materiali Metallici. Ulrico Hoepli. Milano. 1950
- [2] Locati, L. Programmed Fatigue Test, Variable Amplitude Rotat. Metallurgia Italiana. Vol 44, nº 4, págs 135-144. 1952
- [3] Casado, J. A.; Polanco J. A.; Carrascal I. and Gutiérrez-Solana, F. Application of the Locati Method to material selection for reinforced polymeric parts subjected to fatigue. International Conference on Fatigue of Composites. Paris, Junio 1997. Pags: 454-461.
- [4] Casado. J. A. Comportamiento en fatiga de poliamidas reforzadas con fibra de vidrio corta. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. 2001
- [5] McCrum, N. G., Reed, B. E. & Williams, G. Anelastic and dielectrics effects in polymeric solids. John Wiley, London. 1967.
- [6] Carrascal I., Casado J.A., Polanco J.A. y Gutiérrez-Solana F Análisis dinamo-mecánico macroscópico (M-DMA) sobre componentes estructurales de PA 6.6 reforzada con F.V. corta. MATCOM 03. V Congreso Nacional de Mat. Compuestos. Zaragoza (2003)
- [7] Ferry, J. D. Viscoelastic properties of polymers. 3rd ed. Wiley, New York, 1980