

# ESTIMACIÓN DE LAS CONDICIONES CRÍTICAS EN FATIGA DE UN COMPUESTO DE POLIAMIDA Y FIBRA DE VIDRIO POR MEDIO DE UN ENSAYO DE FATIGA ACELERADA (LOCATI) A PARTIR DE LA MEDIDA DEL DAÑO NETO.

I. Carrascal, J. A. Casado, S. Diego, J. A. Polanco, F. Gutiérrez-Solana y P. Miengo

Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales. Universidad de Cantabria  
E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos. Avda. Los Castros s/n, 39005. Santander.

## RESUMEN:

La técnica experimental empleada en este trabajo es el ensayo LOCATI, consistente en aplicar una fuerza máxima escalonada y creciente, a partir de un valor inferior al límite de fatiga, durante un número constante de ciclos. Al alcanzar un cierto nivel de carga, aparece un escalón crítico a partir del cual los valores del daño acumulado pierden su estabilidad y crecen con una velocidad crítica que precede a la rotura del material. La principal ventaja del método es que a partir de una única probeta se pueden estimar las condiciones críticas en fatiga. En este trabajo se propone un modelo para la cuantificación del daño acumulado en cada uno de los escalones del proceso de fatiga a través de la energía almacenada en función de la tensión aplicada. El daño se obtendrá como la variación de la energía almacenada mas la disipada respecto a las condiciones iniciales, es decir como la pérdida de propiedades respecto a las condiciones de partida. El material seleccionado para el trabajo es un compuesto con matriz de Poliamida 6, reforzado con un 25 % en peso de fibra de vidrio corta inyectado en probetas de tracción normalizadas.

## ABSTRACT

The experimental technique used in this work is the LOCATI test which consists of applying a maximum staggered and growing force, from a value lower than the fatigue limit for a constant number of cycles. At a certain load level, it is appeared a critical step at which accumulated damage values lose their stability and grow with a critical speed that preceded the breakage of the material. The main advantage of the method is that from a single standard tensile specimen can estimate the critical conditions in fatigue. This paper proposes a model for quantifying the accumulated damage in each of the steps of the fatigue process through the total energy per cycle (energy stored and energy dissipated) as a function of the applied stress. The damage is going to be obtained as the change in total energy in each cycle with respect to initial conditions, ie as property loss on the initial conditions. The material selected for the work is a composite of polyamide 6 reinforced with 25 wt% of short glass fiber injected into standard tensile specimens.

**KEY WORDS:** Daño, daño neto, fatiga, poliamida, compuesto, Locati

## 1. INTRODUCCIÓN

La determinación del nivel de tensión por debajo del cual no se produce la rotura del material frente a esfuerzos dinámicos, límite de fatiga o endurancia, históricamente se ha obtenido a partir de las curvas de Wöhler o curvas S-N [1]. La realización de este ensayo presenta la problemática de tener que emplear al menos entre 16 y 20 probetas para poder obtener resultados fiables. Una alternativa a este método es el Stair-case, en el cual, a partir de 11-15 probetas, se pueden obtener resultados similares [2]. Por último, en este trabajo, se propone la metodología LOCATI [3,4], que pretende determinar el límite de fatiga a partir de una única probeta. El método LOCATI consiste en un ensayo de fatiga acelerada en el que se van aplicando tensiones crecientes hasta provocar la rotura del material.

Estudios previos han utilizado la metodología LOCATI analizando la deformación de la probeta [5] y la velocidad de la deformación máxima para la

determinación del límite de fatiga [6] ó el ángulo de desfase [7].

En este trabajo se determinará el límite de fatiga del material analizando el daño ocasionado por el proceso de fatiga acelerada por el método LOCATI.

Tradicionalmente [8, 9] la formulación relativa al daño se basa en el concepto de tensión y deformación efectiva. La tensión efectiva es la experimentada por el material debido a la reducción de sección neta por los diferentes mecanismos de daño, de forma que el daño, D, se puede definir a partir de:

$$D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E} \quad (1)$$

Donde E es el módulo elástico del material sin daño y  $\tilde{E}$  es el módulo aparente del material dañado. El parámetro daño, D, representa el grado de deterioro del material, tomando valores desde 0 para materiales sin daño hasta  $D_C$ , daño crítico, cuando se produce el fallo.

El daño generado en fatiga en un material compuesto de matriz polimérica consiste en la creación y crecimiento de discontinuidades como micro fisuras, huecos, crazes, etc. que disminuyen la resistencia del material progresivamente hasta su rotura [10]. Se puede definir este parámetro como la variación de la energía en cada momento respecto a las condiciones iniciales.

## 2. MATERIAL

Las probetas usadas en este trabajo para los ensayos están fabricadas en poliamida 6 reforzada con un 25 % en peso de fibra corta de vidrio (PA6GF25). Las probetas fueron conformadas por inyección y tienen unas dimensiones formalizadas, con forma halterio tipo 1B según UNE-EN ISO 527-2 [11], cuya geometría y dimensiones se reflejan en la Figura 1.

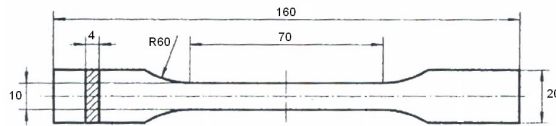


Figura 1.- Probeta tipo halterio

La PA 6 es un material altamente higroscópico y la absorción de humedad puede alterar significativamente sus propiedades mecánicas, especialmente las dinámicas. Por esta razón, previamente, se sometieron las probetas a un tratamiento para dotarlas de una humedad en torno al 2.4 %. Bajo estas condiciones la resistencia mecánica estática alcanza los 100 MPa en rotura con una deformación superior al 5% [12].

## 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para todos los ensayos de fatiga realizados en el desarrollo de este trabajo se mantuvo constante la forma de la onda sinusoidal, la relación de tensiones,  $R = 0.1$ , y la frecuencia,  $f = 5$  Hz. Inicialmente se realizaron ensayos de fatiga monótona hasta rotura entre fuerzas máximas de 1400 y 2700 N, con incrementos de 100 N entre ensayos, con objeto de definir la curva de Wöhler y el límite de fatiga,  $\Delta\sigma_c$ .

Posteriormente se realizaron ensayos de fatiga monótona con interrupciones, de forma que cada 25.000 ciclos se detuvo el ensayo por espacio de una hora, hasta que la temperatura de la probeta recuperó el valor de la ambiental. Estas interrupciones permitirán comprobar el comportamiento frente a fatiga de materiales con daño previo.

Por último se ejecutaron los ensayos de fatiga acelerada LOCATI. Esta metodología 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 a una frecuencia determinada. En la Figura 2 se muestra un esquema del ensayo y en la tabla 1 las variables empleadas.

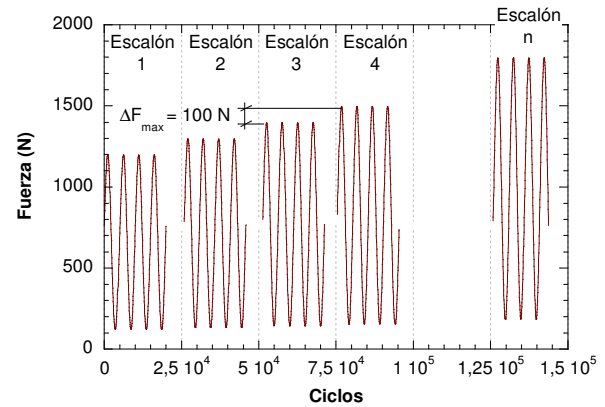


Figura 2.- Esquema de carga del ensayo Locati

Tabla 1- Niveles de carga en el ensayo locati

Esc.	$F_{max}$ (N)	$F_{min}$ (N)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_{min}$ (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)
1	1200	120	30	3	27
2	1300	130	32.5	3.25	29.25
3	1400	140	35	3.5	31.5
4	1500	150	37.5	3.75	33.75
5	1600	160	40	4	36
6	1700	170	42.5	4.25	38.25
7	1800	180	45	4.5	40.5
8	1900	190	47.5	4.75	42.75
9	2000	200	50	5	45
10	2100	210	52.5	5.25	47.25
11	2200	220	55	5.5	49.5
12	2300	230	57.5	5.75	51.75
13	2400	240	60	6	54
14	2500	250	62.5	6.25	56.25
15	2600	260	65	6.5	58.5
16	2700	270	67.5	6.75	60.75

Se realizaron cuatro variantes diferentes incluyendo paradas durante una hora entre cada escalón, variando la duración de los escalones y cambiando la variación de carga entre escalones, según se indica en la tabla 2.

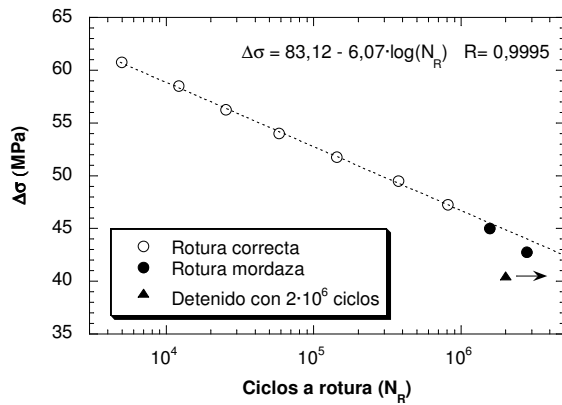
Tabla 2- Tipos de ensayo LOCATI

Tipo	Paradas	Duración escalón	$\Delta F_{max}$
LOCATI 1	NO	25.000 ciclos	100
LOCATI 2	SI	25.000 ciclos	100
LOCATI 3	NO	25.000 ciclos	50
LOCATI 3	NO	50.000 ciclos	100

Para la realización de los ensayos se empleó una máquina servohidráulica de  $\pm 5$  kN de capacidad a la que se acopla un extensómetro dinámico de 50 mm de base de medida y  $\pm 12.5$  mm de recorrido para la medida de las deformaciones de la probeta.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Como resumen de los resultados de fatiga monótona se muestra en la Figura 3 el diagrama de Wöhler



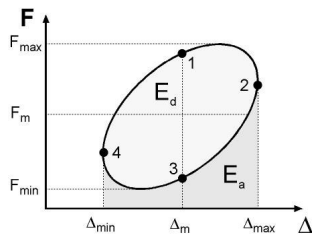
**Figura 3.-** Diagrama de Wöhler

El límite de fatiga se establece para  $\Delta\sigma = 40.5$  MPa (180-1800 N) ya que todas las variables analizadas se habían estabilizado al cabo de  $2 \cdot 10^6$  ciclos.

Durante el proceso de fatiga, la energía en el volumen de material constituido por un prisma de base la sección transversal de la probeta y de altura la separación entre puntos de referencia del extensómetro, dentro de un ciclo y entre dos instantes de tiempo  $t_i$  y  $t_{i+1}$  se obtiene a partir de [13]:

$$E_{t_i/t_{i+1}} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} dE = \int_{t_i}^{t_{i+1}} F \cdot d\Delta \quad (2)$$

Para un ciclo completo esta energía total puede descomponerse, tal como se ve en la Figura 4, en energía disipada,  $E_d$ , representada por el bucle de histéresis y energía almacenada,  $E_a$ , recuperada por la placa tras finalizar el ciclo.



**Figura 4.-** Energía almacenada y disipada

Será la energía total por ciclo,  $E_T$ , la empleada para la determinación del daño generado en el proceso de fatiga.

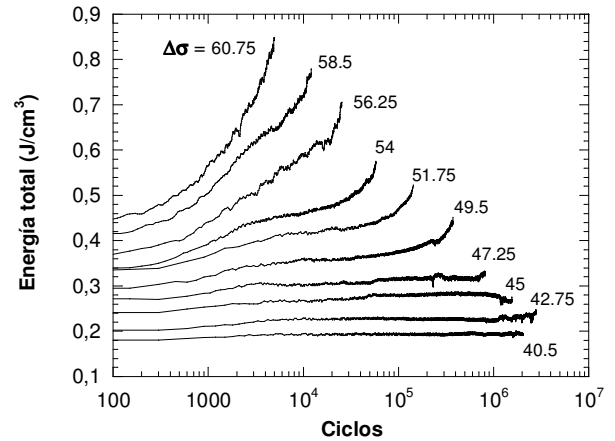
$$E_T = E_a + E_d \quad (3)$$

Se puede apreciar en la figura 5 que en los procesos de fatiga térmica, tensiones más elevadas, la  $E_T$  tienen una clara tendencia creciente, mientras que en la fatiga mecánica los parámetros energéticos tienden a estabilizarse o incluso disminuir en alguno de los casos.

A partir de este momento se define un parámetro, que se denominará **daño total**,  $D_T$ , para cuantificar el daño sufrido por el material durante el proceso de fatiga. La definición de este parámetro se realizará a partir de la

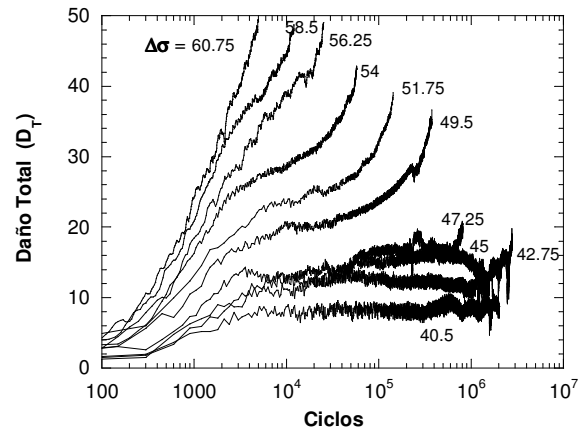
variación de parámetros energéticos respecto a su valor inicial y se obtendrá a partir de la expresión:

$$D_T = \left(1 - \frac{E_{T0}}{E_{Ti}}\right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$



**Figura 5.-** Evolución de la energía total,  $E_T$

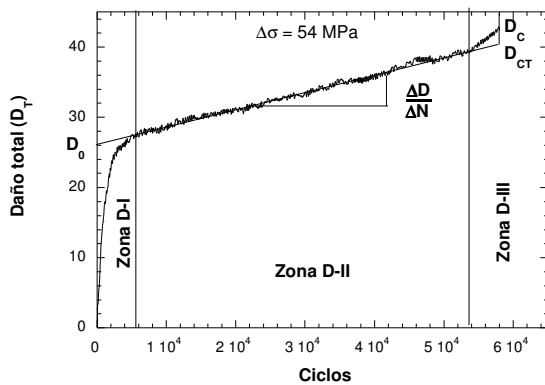
Donde  $E_{T0}$  será la energía total medida en el primero de los ciclos de fatiga y  $E_{Ti}$  la energía total medida en el ciclo  $i$ . En el gráfico de la Figura 6 se representa la evolución del daño total para los diferentes niveles de carga.



**Figura 6.-** Evolución del daño total para los ensayos de fatiga monótona

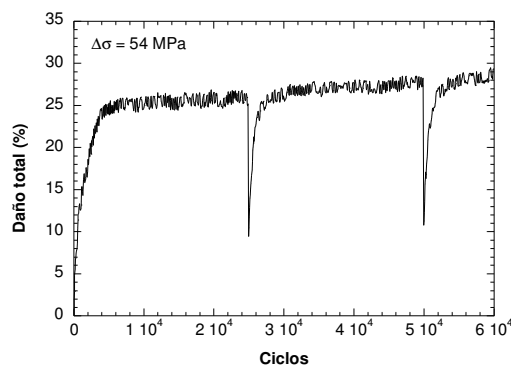
Se puede observar que para el límite de fatiga,  $\Delta\sigma = 40.5$  MPa, tanto la  $E_T$  como el  $D_T$  se encuentra completamente estabilizada al cabo de  $2 \cdot 10^6$  ciclos.

En trabajos previos [13] se comprobó que el daño en todos los casos seguía un mismo patrón, con un crecimiento rápido inicial con pendiente decreciente, zona D-I, después un crecimiento lineal del daño, zona D-II y por último un crecimiento acelerado hasta rotura, zona D-III, como se puede ver en la Figura 7. Tanto la velocidad de crecimiento,  $\Delta D_T / \Delta N$ , como la ordenada en el origen del ajuste del tramo D-II,  $D_0$ , y el daño crítico, real y teórico,  $D_C$  y  $D_{CT}$ , son crecientes con el nivel tensional.



**Figura 7.- Evolución del daño total ( $\Delta\sigma = 54$  MPa)**

Al analizar los resultados de la fatiga monótona con interrupciones, Figura 8, se puede observar que parte del daño ocasionado durante un escalón de carga (25.000 ciclos) se recupera durante el periodo de reposo, de forma que cuando se inicia el siguiente escalón el daño inicial es inferior al daño con el que finalizó el escalón previo. Es decir que el daño estaría compuesto de un componente elástico, que se recupera al ceder el esfuerzo cíclico y otro componente plástico que es el que permanece tras el esfuerzo y el que realmente ocasiona deterioro en el material.

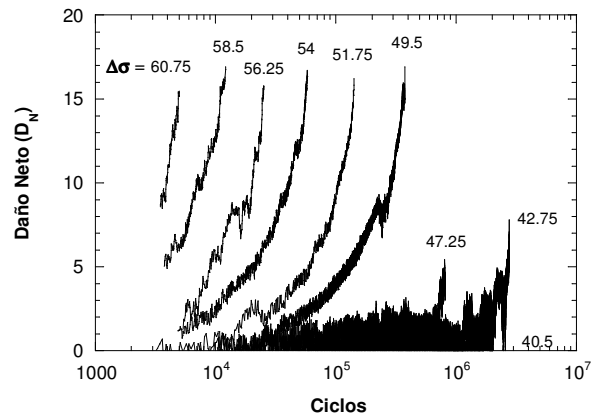


**Figura 8.- Evolución del daño total con interrupciones**

La componente elástica del daño se identificará con la ordenada en el origen del tramo D-II,  $D_0$ , o daño inicial, y por tanto se podrá definir un daño plástico o neto,  $D_N$ , a partir de la expresión:

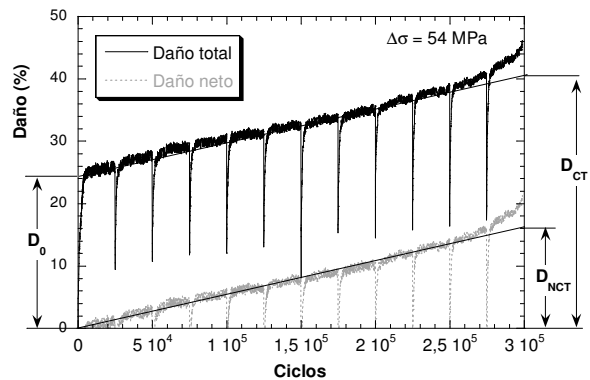
$$D_N = D_T - D_0 \quad (5)$$

La figura 9 representa la evolución del daño neto para todos los niveles de fatiga monótona sin interrupciones. A diferencia de los resultados obtenidos para el daño total, donde los valores del daño crítico dependían del nivel tensional, aumentando a medida que se incrementaba el esfuerzo, para el daño neto se puede comprobar que en el caso de fatiga térmica los valores de daño neto crítico teórico,  $D_{NCT}$ , se estabilizan en torno al 15 %, independientemente de la tensión. En el caso de la fatiga mecánica no se ha podido comprobar el valor del daño crítico porque, como se ha comentado, la rotura ha tenido lugar por la mordaza, no alcanzando por tanto el número de ciclos de rotura teórico.



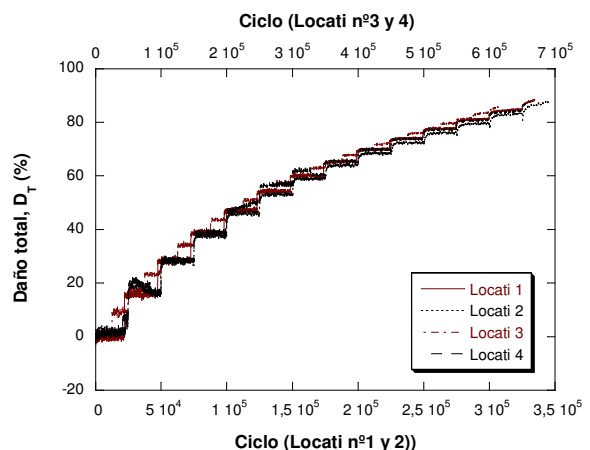
**Figura 9.- Daño neto. Fatiga monótona**

En la figura 10 se comprueba que en el caso de la fatiga interrumpida el número de ciclos es mayor que en la monótona del mismo nivel, pero el daño neto teórico también alcanza valores próximos al 15 %.



**Figura 10.- Daño neto, fatiga interrumpida, (54 MPa)**

Analizando la evolución del daño total,  $D_T$ , en los ensayos LOCATI, no se detecta ningún indicio que permita establecer cuál de los escalones es el que corresponde con el límite de fatiga. La figura 11 representa, en doble eje de abscisas para facilitar la comparación entre los diferentes ensayos, la evolución del daño total comprobando que los resultados de los cuatro son coincidentes alcanzando valores en rotura muy similares.



**Figura 11.- Daño total ensayo LOCATI**

La igualdad de comportamientos también se observa al analizar la evolución del ángulo de desfase entre la señal de carga y deformación, figura 12. También se puede comprobar en dicha figura que el valor del desfase crítico es similar en todos los casos y próximo a 0.12 radianes, por lo que este valor también podría ser una constante en rotura.

Debido a que el nivel tensional a lo largo del ensayo LOCATI es cambiante se define un nuevo parámetro que será el daño neto individual,  $D_I$ , que tendrá en cuenta la variación de energía total respecto a la inicial de cada uno de los escalones.

$$D_I = \left( 1 - \frac{E_{T0j}}{E_{Tij}} \right) \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

Donde  $E_{T0j}$  es la energía total inicial del escalón  $j$  y  $E_{Tij}$  es la energía total del instante  $i$  del escalón  $j$ .

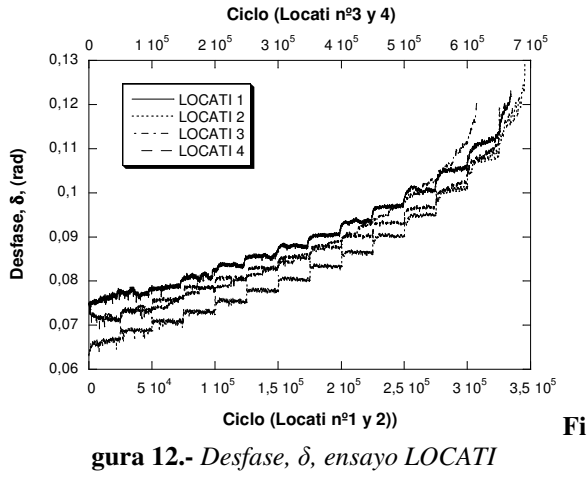


Figura 12.- Desfase,  $\delta$ , ensayo LOCATI

Este daño  $D_I$  seguirá teniendo componente elástica y neta, por lo que será necesaria la determinación del daño neto individual  $D_{NI}$ .

Para el primer escalón se empleará el método comentado anteriormente, expresión (5), y para el resto de escalones se utiliza en procedimiento descrito en la expresión (7) y figura 13.

$$D_{NIj} = D_{Ij} - (D_{0j} - D_{NIj-1}) \quad (7)$$

Siendo  $D_{NIj-1}$  el último valor del daño neto individual del escalón anterior.

En las figuras 14 a 17 se representa el  $D_{NI}$  para los cuatro ensayos LOCATI realizados. Sobre los gráficos se indica el escalón que corresponde con el límite de fatiga,  $\Delta\sigma_e$ , medido a partir de los ensayos de fatiga monótona. Se puede observar que el  $D_{NI}$  en todos los casos se mantiene constante por debajo del  $\Delta\sigma_e$  y una vez superado comienza a crecer. Por tanto se puede definir el límite de fatiga a partir del daño neto individual,  $D_{NI}$ , en un ensayo LOCATI como aquél escalón a partir del que el parámetro comienza a crecer.

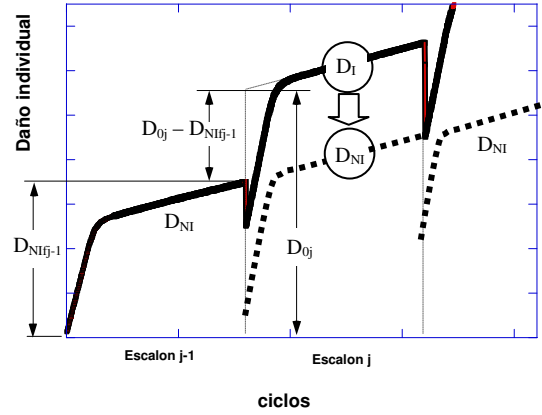


Figura 13.- Determinación del  $D_{NI}$

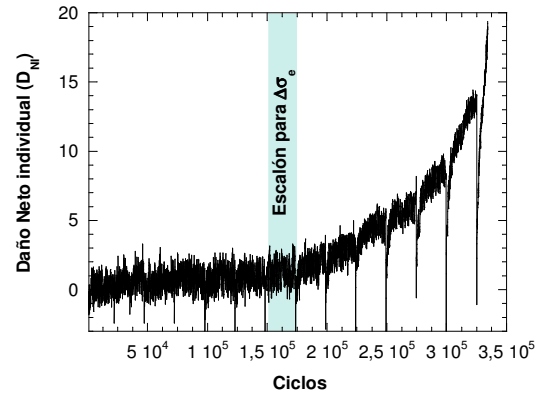


Figura 14.-  $D_{NI}$  LOCATI nº 1

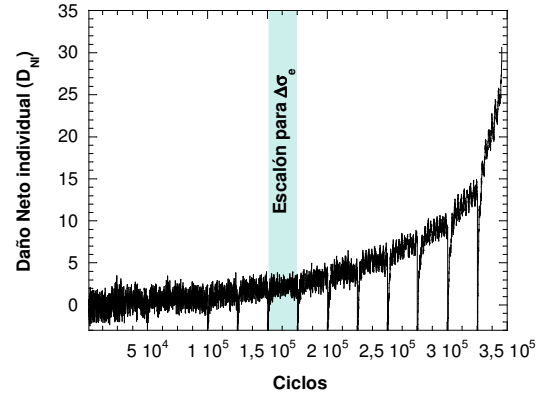


Figura 15.-  $D_{NI}$  LOCATI nº 2

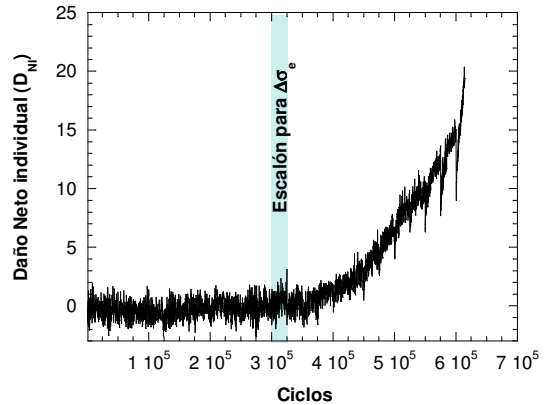
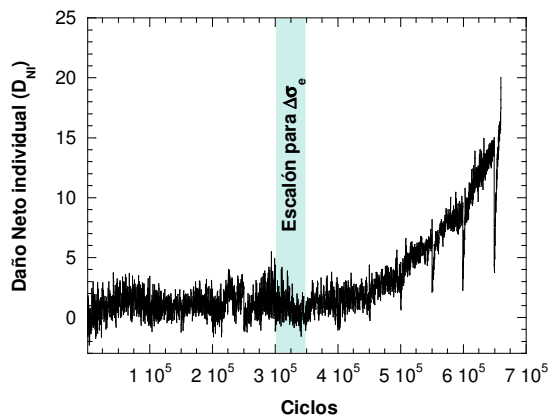


Figura 16.-  $D_{NI}$  LOCATI nº 3



**Figura 17.-  $D_{NI}$  LOCATI n° 4**

Se observa, además, que el valor crítico teórico de daño neto individual se situaría en un valor ligeramente superior al 15%, como ya se vio en los ensayos de fatiga monótona e interrumpida.

## 5.CONCLUSIONES

En este apartado se destacan las conclusiones más relevantes derivadas del trabajo realizado:

- A partir de ensayos de fatiga monótona interrumpida se ha podido comprobar que el daño total presenta dos componentes: el daño inicial o elástico y el daño plástico o neto.
- Se propone un modelo para la identificación del daño neto sufrido en un proceso de fatiga a través de la variación de la energía total en cada momento respecto a las condiciones iniciales.
- El daño neto crítico, en procesos de fatiga térmica se mantiene constante, alcanzando valores cercanos al 15% para la PA6GF25.
- Los resultados obtenidos a partir de los cuatro ensayos LOCATI ejecutados son muy similares, de lo que se deduce la poca influencia del número de ciclos por escalón, de la existencia o no de paradas y del valor del incremento de tensiones entre los escalones. Se recomienda, por tanto, la realización del ensayo más corto: sin paradas, con 25000 ciclos por escalón y variaciones de 100 N para la  $F_{max}$ .
- Se puede definir el límite de fatiga a partir del daño neto individual,  $D_{NI}$ , en un ensayo LOCATI como aquél nivel a partir del que este parámetro comienza a crecer.

## 6.REFERENCIAS

[1] Wöhler, A. "Versuche über die festigkeit der Eisenbahn Wagenachsen Zeitschrift für Bauwessn", 1860

[2] Rice, R. C. "Fatigue data Analysis" Metals Handbook, 9<sup>th</sup> ed. Vol. 8, Mechanical Testing. American Society for Metals Park, Ohio, EEUU, 1985.

[3] Locati, L. La Fatica dei Materiali Metallici. Ulrico Hoepli. Milano. 1950

[4] Locati, L. Programmed Fatigue Test, Variable Amplitude Rotat. Metallurgia Italiana. Vol 44, n° 4, págs 135-144. 1952

[5] Casado, J.A. Polanco, J.A., Carrascal, I. Gutiérrez-Solana F. Aplicación of the Locati method to material selection for reinforced polymeric parts subjected to Fatigue. International Conference on Fatigue of Composites. Pags: 454-461. Paris. 1997

[6] Casado, J. A. "Casado J.A. "Comportamiento en fatiga de poliamidas reforzadas con fibra de vidrio corta". Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, 2001

[7] Casado, J. A. Carrascal, I., Polanco, J.A. Gutiérrez-Solana, F. Fatigue failure of short glass fibre reinforced PA 6.6 structural pieces for railway track fasteners. Engineering Failure Analysis 13. Pgs 182-197. 2006

[8] Sullivan, R. W. Development of a viscoelastic continuum damage model for cyclic loading. Mechanics of Time-Dependent Materials 12 (4), pp. 329-342

[9] Gamstedt, E.K, Berglund, L.A. Peijs, T. Fatigue mechanisms in unidirectional glass-fibre-reinforced polypropylene. Composites Science and Technology, 59. Pags 759-768. 1999

[10] Jessen, S.M. [1] Jessen, S.M. and Plumtree A. Continuum damage mechanics applied to cyclic behaviour of a glass fibre composites pultrusion. Composites. Vol 22. n° 3, pg 181-190. 1991,

[11] UNE-EN ISO 527-2:1997. "Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción". Parte 2: "Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión".

[12] Carrascal, I, Casado, J. A., S. Diego, Polanco, J.A. Gutiérrez-Solana. Modelo de comportamiento en fatiga basado en el daño continuo medido a partir de parámetros energéticos de un polímero compuesto. Anales de Mecánica de la Fractura, 26. Vol. 1. Pgs 277-282. 2009.

[13] Carrascal, I, Casado, J. A., Polanco, J.A. Gutiérrez-Solana. Aplicación del análisis dinamo-mecánico a la determinación de las condiciones críticas en fatiga de materiales poliméricos. Anales de Mecánica de la Fractura, 25. Vol. 1. Pgs 397-402. 2008.