

## DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CARGA DE APERTURA DE GRIETA EN FATIGA BAJO CARGAS ALEATORIAS

A.S. Cruces<sup>1</sup>, D. Camas<sup>1</sup>, P. Lopez-Crespo<sup>1</sup>, J. Zapatero<sup>1</sup>, B. Moreno<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Materiales y Fabricación,  
Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Málaga  
C/ Dr Ortiz Ramos s/n, 29071, Málaga, España  
\* Persona de contacto: [bmoreno@uma.es](mailto:bmoreno@uma.es)

### RESUMEN

El concepto de carga de apertura o cierre de grieta es ampliamente utilizado en fatiga para justificar el comportamiento del crecimiento de grietas con distintas relaciones de carga y el efecto de interacción de las cargas. Hasta la fecha son numerosas las técnicas experimentales propuestas para medir la apertura de grieta y entre ellas los métodos de flexibilidad son ampliamente utilizados por su simplicidad. En este trabajo se propone una modificación del método propuesto por la ASTM y se presentan los resultados obtenidos en ensayos de crecimiento de grietas por fatiga bajo cargas aleatorias. Así mismo, los valores experimentales de cargas de apertura son comparados con los calculados analíticamente por un modelo de simulación tipo "strip-yield" implementado en el software NASGRO. En general, se ha encontrado una concordancia razonablemente buena entre los valores experimentales y los obtenidos por simulación.

**PALABRAS CLAVE:** Cargas de apertura/cierre de grieta, fatiga aleatoria, métodos de flexibilidad.

### ABSTRACT

The crack opening/closure load concept is widely used to justify the fatigue crack growth behavior with different load ratios and the load interaction effects. Many experimental techniques have been proposed to measure crack opening / closure load and, among them, compliance methods are widely used for their simplicity. In this paper, a modification of the ASTM method is proposed and the results with fatigue crack growth tests data under random loads are presented. Likewise, the experimental opening load values are compared with those calculated analytically by a "strip-yield" simulation model implemented in NASGRO software. In general, a reasonably good agreement has been found between the experimental values and those obtained by simulation.

**KEYWORDS:** Crack opening/closure load, random loads, compliance methods

### 1. INTRODUCCIÓN

La propagación de grietas por fatiga bajo cargas aleatorias o de amplitud variable son un problema común en condiciones de servicio en los componentes reales. La mayor complejidad del problema frente al caso de cargas de amplitud constante justifica la existencia de los muchos modelos propuestos para estimar la vida a fatiga. Entre los diversos modelos propuestos, el concepto de cierre de grieta introducido por Elber [1] es usado ampliamente para describir el efecto de interacción de las cargas. En particular los modelos denominados Strip Yield, implementados en software comerciales como NASGRO [2] o Fastran, hacen uso de dicho concepto. Estos modelos caracterizan el crecimiento de grieta en función del factor de intensidad de tensiones efectivo,  $\Delta K_{\text{eff}} = K_{\text{max}} - K_{\text{op}}$ , siendo  $K_{\text{op}}$  el factor de intensidad de tensiones al cual la grieta abre. Los modelos Strip Yield

calculan de forma analítica la tensión de apertura de la grieta,  $P_{\text{op}}$ , y con ella  $K_{\text{op}}$ . La validez de dichos modelos es generalmente analizada en base a su capacidad de predecir el crecimiento de grieta pero se hace necesario validar los valores de dichas tensiones de apertura utilizadas por el modelo con medidas experimentales, objetivo de este trabajo.

Hasta la fecha son numerosas las técnicas experimentales propuestas para medir la apertura de grieta y entre ellas los métodos de flexibilidad son ampliamente utilizados por su simplicidad [3-8]. Dichos métodos se basan en determinar el cambio de flexibilidad (pendiente de la curva desplazamiento o deformación frente a la carga) del elemento al pasar de la grieta completamente cerrada a abierta durante el ciclo de carga. Dichas medidas de desplazamiento/deformación pueden tomarse en el entorno cercano a la grieta o remoto, y haciendo uso de

extensómetros tipo COD, galgas extensométricas o correlación de imágenes digitales entre otras posibilidades. Los métodos más simples se basan en la curva de carga/desplazamiento donde la carga de apertura de la grieta ( $P_{op}$ ) se determina a partir de la no linealidad observada en la curva, que es muy fácil de aplicar pero tiene una sensibilidad baja. Otros métodos posteriores basados en la curva carga/desplazamiento diferencial han demostrado que pueden detectar  $P_{op}$  cuando es difícilmente observable con el método anterior. El principal inconveniente de estos métodos es que  $P_{op}$  generalmente se determina visualmente y, en consecuencia, es un método dependiente del observador. Para evitar esta subjetividad, la ASTM [9] recomienda el procedimiento descrito en el epígrafe 3.

En este trabajo se analiza la capacidad del método recomendado por la ASTM para la determinación de  $P_{op}$  a partir de datos de ensayos de fatiga con carga aleatoria. A partir del análisis se propone una modificación de dicho procedimiento y se comparan los valores así obtenidos con los calculados analíticamente por un modelo de simulación tipo “strip-yield” implementado en el software NASGRO.

## 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Los datos experimentales corresponden a los obtenidos en dos probetas de una amplia serie de ensayos de crecimiento de grietas por fatiga con carga aleatoria realizados por los autores [10]. Se ensayaron probetas CT de espesor  $B=12$  mm y ancho  $W=50$  mm de la aleación de aluminio Al2024-T351. Las cargas aleatorias correspondieron a procesos aleatorios estacionarios gaussianos que se caracterizaron por diferentes formas de la función de densidad espectral de las cargas [psd,  $S(w)$ ] y diferentes niveles de carga representados por la raíz media cuadrática. Las diferentes historias de carga aplicadas en los ensayos se corresponden con la secuencia de picos y valles obtenidos numéricamente mediante un algoritmo de simulación a partir de la función psd. Todos los ensayos se realizaron utilizando dichas secuencias de picos y valles convertidos por el software INSTRON Flaps en un historial de carga continuo, uniendo cada extremo consecutivo (pico o valle) con una función semisenoidal. Cada historial de carga se aplicó a una probeta diferente y se repitió ininterrumpidamente hasta alcanzar la longitud final de grieta deseada. La longitud de la grieta se midió utilizando un instrumento de caída de potencial de corriente alterna (ACPD) y se obtuvieron las curvas de crecimiento de grieta ( $a-N$ ) a lo largo del ensayo.

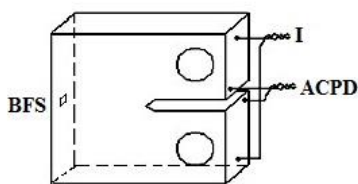


Figura 1. Conexiones para las medidas en la probeta

Para obtener información adicional y poder medir la carga de apertura de grieta, se midió la deformación en la cara posterior de la probeta mediante una galga extensométrica (BFS o back face strain) como se representa en la figura 1. Durante los ensayos de crecimiento de grietas, se registraron y almacenaron la carga aplicada y la deformación BFS. La frecuencia de muestreo fue de 2000 Hz para conseguir al menos cien datos para la parte del ciclo de carga y para la de descarga. Estos datos se registraron durante 20 ciclos consecutivos completos, generándose un registro cada incremento de longitud de la grieta de 0,5 mm. La figura 2 muestra los valores de carga de uno de esos registros.

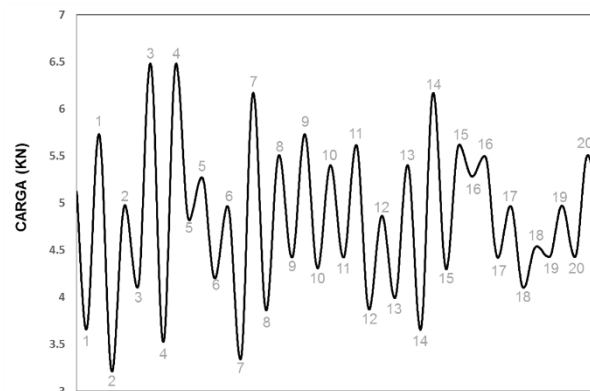


Figura 2. Registro de cargas

## 3. DETERMINACIÓN DE LA CARGA DE APERTURA DE GRIETA

En primer lugar se describe aquí brevemente el método de flexibilidad recomendado por la ASTM [9]. El procedimiento requiere de las medidas de desplazamiento o deformación frente a la carga (curva de flexibilidad) para un ciclo completo de carga (figura 3). En la curva de descarga, se ajusta una recta por mínimos cuadrados a un segmento en la parte superior de la curva que abarque aproximadamente al 25% del rango de carga. La pendiente de esa línea se asume como la flexibilidad correspondiente a la grieta totalmente abierta denominada en la ecuación 1 “open-crack compliance”. A continuación en la curva de carga, se determina la pendiente de las líneas rectas ajustadas a segmentos de la curva que se extienden en un rango de carga del 10 % y se solapan en un 5 %. El valor de la pendiente de cada uno de esos segmentos asociado al punto medio se denomina en la ecuación 1 “compliance”. La variación relativa de flexibilidad entre la correspondiente a la grieta totalmente abierta y la de los distintos segmentos, denominada “compliance offset”, se determina según la ecuación 1:

$$\text{Compliance offset} = \frac{\text{open crack compliance} - \text{compliance}}{\text{open crack compliance}} \times 100$$

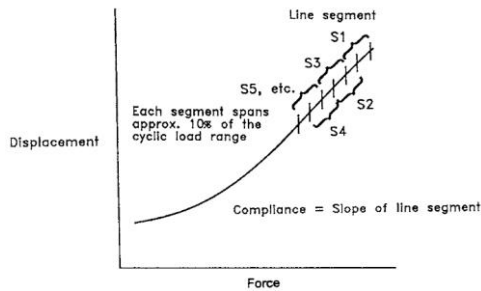


Figura 3. Determinación de la variación de flexibilidad en el semiciclo de carga

El valor de la carga de apertura de la grieta ( $P_{op}$ ) se determina en el punto donde la pendiente de la curva de flexibilidad se desvía en una pequeña cantidad predeterminada (denominada *offset criterion*) de la parte lineal (figura 4). En este trabajo se estableció un valor de offset del 2 % recomendado.

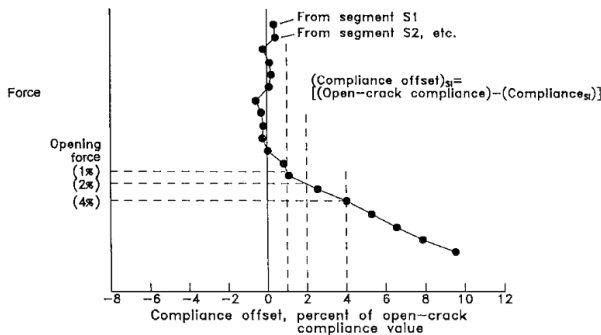


Figura 4. Determinación de la carga de apertura para distintos valores de offset

Uno de los inconvenientes del método, analizados en profundidad por Song et al [8], es el problema de discontinuidad que se debe a que el método no proporciona valores de carga de apertura en el rango entre  $P_{min}+0.05\Delta P$  y  $P_{min}$ . Para solventar el problema dichos autores proponen desplazar el segmento un 1%, en lugar del 5%, entre  $P_{min}+0.1\Delta P$  y  $P_{min}+0.05\Delta P$  obteniendo seis puntos a los que ajustar una línea recta para obtener por extrapolación el valor correspondiente a  $P_{min}$ .

Entre las recomendaciones del procedimiento se incluye que la frecuencia de muestreo en la adquisición de datos debe ser tal que proporcione al menos un par de valores (desplazamiento/deformación y carga) cada intervalo del 2 % del rango de carga. Dependiendo de la forma de onda de la carga cíclica aplicada se requerirá una frecuencia de muestreo distinta para cumplir dicha recomendación. Si la forma de onda del ciclo de carga es triangular, una frecuencia de muestreo que proporcione 100 datos por ciclo completo (50 datos en cada parte de subida y bajada del ciclo) cumple la recomendación y todos los puntos de la grafica representada en la figura 4 corresponderían al ajuste por mínimos cuadrados de 5 puntos de la curva de flexibilidad desplazamiento-carga.

En este estudio la carga de apertura de la grieta se determina a partir de la curva deformación (BFS)-carga, que es una de las opciones recomendadas para probetas CT. En este caso se comprueba que con los 200 datos por ciclo muestreados se cumple la recomendación. No obstante, es necesario observar que, dado que la forma de onda de la carga es semisenoidal, la aplicación del método ASTM descrito lleva a que el número de puntos ajustado por mínimos cuadrados para cada segmento no sea idéntico en todos los casos. En concreto, en el intervalo entre  $P_{min}$  y  $P_{min}+0.1\Delta P$  se ajustan 21 puntos, mientras que en los 4 segmentos sucesivos se ajustan 11, 9, 8, y 7 puntos.

El método ASTM ha sido analizado en numerosos trabajos publicados [7,8] en los que se discuten diversos aspectos, entre ellos la influencia de la longitud de los segmentos ajustados. Dicha influencia se debe a considerar un número distinto de puntos en el ajuste lineal por mínimos cuadrados para aproximar la pendiente y obtener la curva de variación relativa de flexibilidad. Parece por tanto apropiado y coherente realizar dichos ajustes con el mismo número de puntos.

En base al razonamiento anterior, en este trabajo se propone una modificación del método, aplicable para formas de onda de la carga semisenoidal, que es el siguiente:

- Partiendo del punto correspondiente al mínimo de carga se ajustan por mínimos cuadrados segmentos de 9 puntos a la curva deformación-carga.
- El valor de la pendiente de cada uno de esos segmentos se adopta como el valor de flexibilidad (compliance en la ecuación 1) asociado al punto central (5º punto).
- El segmento a ajustar se desplaza, ajustando de nuevo 9 puntos, partiendo del punto central del segmento anterior.
- El proceso se repite hasta alcanzar el valor correspondiente al 90 % del rango de carga.

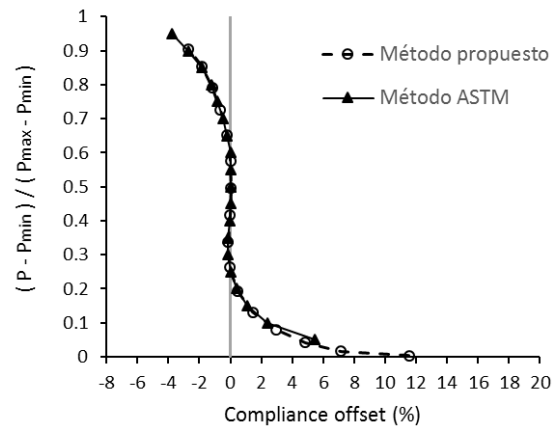


Figura 5. Comparación entre el método ASTM y el método propuesto

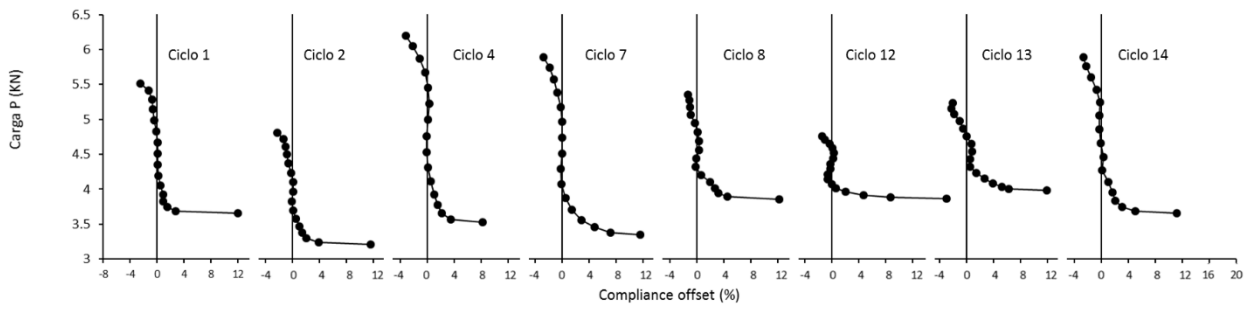


Figura 6. Resultados para distintos ciclos

En la figura 5 se representan los resultados obtenidos mediante el método ASTM junto a los obtenidos con el método propuesto para el ciclo 7 de la figura 2. Puede observarse que ambas curvas son prácticamente coincidentes salvo en la parte baja donde con el método propuesto pueden obtenerse valores de flexibilidad hasta valores más próximos a  $P_{min}$ . Así pues, la principal ventaja del método propuesto es que permite obtener valores de flexibilidad por debajo de  $P_{min}+0.05\Delta P$  salvando el problema discontinuidad comentado anteriormente. Otra de las ventajas es que el procedimiento es más fácil de implementar y evita tener que extrapolar los resultados como en la solución propuesta por Song [8].

#### 4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El procedimiento anteriormente descrito ha sido empleado para obtener las cargas de apertura en los 20 ciclos del registro de cargas mostrado en la figura 2.

Para obtener la flexibilidad de la grieta totalmente abierta, se ajustó un segmento a la parte superior de la curva de descarga 3-4 en la figura 2, que corresponde al máximo rango, observándose además que dicho valor se mantiene aproximadamente constante para todos los ciclos del registro.

Para la determinación de la carga de apertura se estableció un valor de offset del 2%, algunas de las curvas obtenidas se muestran en la figura 6.

En algunos de los ciclos, en general en aquellos cuya carga mínima es alta, no se pudo obtener el valor de  $P_{op}$  porque las curvas de variación de flexibilidad no muestran el cambio de grieta cerrada a grieta abierta, con lo que se concluye que para dichos ciclos la carga de apertura es inferior a la mínima y el comportamiento mostrado en la curva corresponde a la grieta totalmente abierta. Dos de estos ejemplos, obtenidos para los ciclos 5 y 20, se muestran en la figura 7.

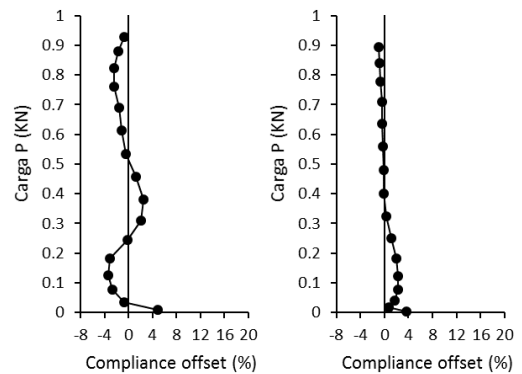


Figura 7. Resultados obtenidos para los ciclos de carga 5 (a) y 20 (b) con valores de carga normalizados

Además de la obtención de  $P_{op}$  es objetivo de este trabajo comparar estos resultados obtenidos experimentalmente con los calculados por el modelo Strip Yield de simulación implementado en el software NASGRO. Haciendo uso de dicho modelo se concluyó que la simulación ciclo a ciclo del crecimiento de grietas con cargas aleatorias predice de forma satisfactoria los resultados experimentales obtenidos en los ensayos [11]. De los resultados de simulación ciclo al ciclo con el modelo se obtiene para cada ciclo de carga, secuencia valle-pico, el valor del parámetro U:

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} = \frac{P_{max} - P_{op}}{P_{max} - P_{min}}$$

En la figura 8 se representan los valores de dicho parámetro obtenidos con los resultados experimentales y la aplicación del método descrito junto a los resultados obtenidos por simulación.

Los resultados mostrados en la figura 8 muestran una concordancia razonablemente buena entre los valores experimentales y los obtenidos por simulación. En general, son menores los valores de U obtenidos experimentalmente, lo que significa que los valores de carga de apertura son mayores que los obtenidos por simulación.

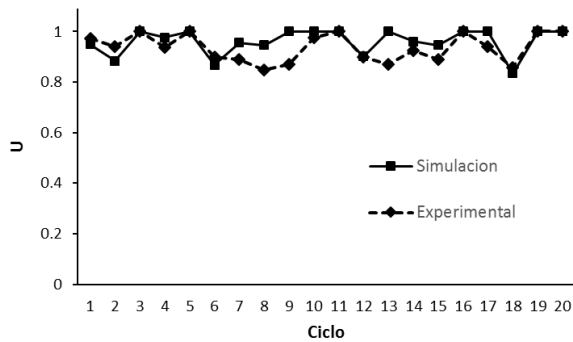


Figura 8. Comparación del parámetro  $U$  obtenido por simulación y experimentalmente

## REFERENCIAS

- [1] Elber W. The significance of fatigue crack closure; Damage tolerance in aircraft structures; 1971[ASTM STP 486].
- [2] NASGRO 6.0, Reference Manual (version 6.02, September 2010), Fracture mechanics and fatigue crack growth analysis software, NASA Johnson Space Center and Southwest Research Institute; 2010.
- [3] Kim JH, Song JH. Crack growth and closure behaviour of surface cracks under axial loading. Fatigue Frac Eng Mater Struct 1992;15:477-89.
- [4] Pang CM, Song JH. Crack growth and closure behavior of short fatigue crack. Eng Fract Mech 1994;47:327-43.
- [5] Song JH, Kim CY, Lee SY. Crack growth and closure behavior of short and long fatigue crack under random loading. J ASTM Int 2004;1(8).
- [6] Kujawski D, Stoychev S. Parametric study on the variability of opening load determination. Int J Fatigue 2003;25:1181-7.
- [7] Skorupa M, Machniewicz T, Skorupa A. Applicability of the ASTM compliance offset method to determine crack closure levels for structural steel. Int J Fatigue 2007;29:1434-51.
- [8] Chung Y, Song J, Improvement of ASTM compliance offset method for precise determination of crack opening load, International Journal of Fatigue, 2009;31:809-19.
- [9] ASTM E 647-08. Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates. In: Annual book of ASTM standards 2009; 03.01.
- [10] Moreno B, Zapatero J, Dominguez J, An experimental analysis of fatigue crack growth under random loading, International Journal of Fatigue (2003) 597–608.
- [11] Moreno B, Martin A, Lopez-Crespo P, Zapatero J, Dominguez J, Estimations of fatigue life and variability under random loading in aluminum Al-2024T351 using strip yield models from NASGRO International Journal of Fatigue 91 (2016) 414–422.