

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL CIERRE DE GRIETA EN FATIGA.**

Belén Moreno\*, José Zapatero\* y José Pascual\*

\*Departamento de Ingeniería Civil de Materiales y Fabricación  
E.T.S.I.I. de Málaga. Plaza del Ejido s/n. 29013 Málaga

**Resumen.** El concepto de cierre de grieta, introducido por Elber, es fundamental a la hora de abordar procesos de crecimiento de grieta en fatiga. La medición de las cargas o tensiones que producen el cierre, es una tarea compleja que necesita de técnicas de gran sensibilidad, para poder determinar la variación de comportamiento que se produce al pasar de la situación de grieta parcialmente cerrada a completamente abierta. En el trabajo que se presenta se mide la tensión de cierre mediante extensometría, utilizando en los ensayos probetas CT y la aleación de aluminio AL-2024-T351. Se han comparado distintos criterios utilizados en la determinación de la carga de cierre, encontrándose grandes diferencias entre ellos, y se propone un proceso diferencial para la determinación de la carga de cierre, obteniéndose unos resultados con una dispersión muy pequeña.

**Abstract.** The concept of crack closure, introduced by Elber, it is fundamental in order to approach processes of crack growth in fatigue. The measurement of the loads or tensions that produce the close, it is a complex task that needs of techniques of great sensibility, for determine the behaviour variation that is produced upon going from the crack situation partially closed to thoroughly opened. In this paper is measured the crack closure load through strain gage, using in the test CT specimen and the aluminium alloy 2024-T351. They have been compared different criteria used in the determination of the closure load, being found large differences between them, and is proposed a differential process for the determination of the closure load, being obtained some results with a very small dispersion.

**1. INTRODUCCIÓN**

El incremento en la longitud de grieta en elementos sometidos a cargas cíclicas, está relacionado con la carga que se aplica a la grieta cuando esta está completamente abierta. Está comprobado que debido a distintos mecanismos se producen ciertas tensiones residuales que impiden o favorecen la apertura de las superficies de grieta. Si estas tensiones residuales son de compresión, parte de la carga de tracción aplicada se empleará en vencer las tensiones residuales, no produciendo crecimiento, siendo la carga remanente a partir de la apertura total de la grieta, la que produce el crecimiento de la grieta. Este concepto denominado de cierre de grieta, fue primeramente introducido por Elber [1], asumiendo que la grieta está parcialmente cerrada durante el ciclo de carga. La carga a partir de

la cual la grieta comienza a cerrarse, es la denominada carga de cierre de grieta ( $P_{cl}$ ). La parte de los rangos de carga, tensión o factor de intensidad de tensiones aplicados, que producen el crecimiento de una grieta son denominados efectivos, definiéndose como:  $\Delta K_{ef} = K_{max} - K_{cl}$ , donde  $K_{cl}$  es el factor de intensidad de tensiones cuando la grieta está completamente abierta.

Se suele utilizar la relación  $U = \Delta K_{ef} / \Delta K$  como medida de la tensión de cierre. Se han propuesto gran cantidad de relaciones empíricas [2-5], para muy diversos materiales, que obtienen el valor de U en función de R ( $P_{min}/P_{max}$ ). A partir de la expresión de U, se puede obtener una relación entre tensión de

cierre ( $S_{cl}$ ), tensión máxima aplicada en cada ciclo ( $S_{cl}$ ) y  $R$  :

$$S_{cl} = S_{\max}(1 - U(1 - R)) \quad (1)$$

El conocimiento y determinación de una forma precisa de la carga o tensión que produce el cierre de la grieta, es pues fundamental a la hora de predecir el crecimiento en fenómenos de fatiga.

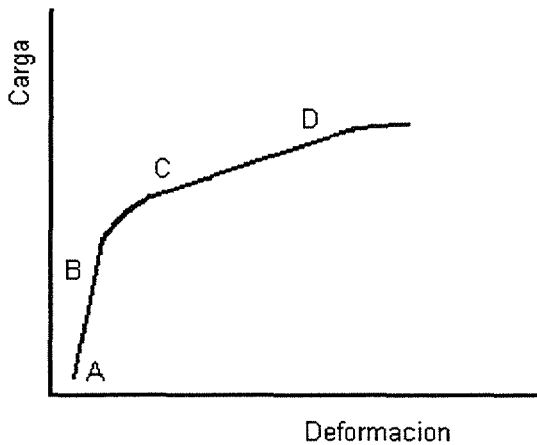


Fig. 1. Diagrama típico carga-deformación para una probeta agrietada

La mayoría de los métodos para la determinación de la tensión de cierre, se basan en determinar el cambio de flexibilidad del elemento al pasar de la grieta completamente abierta a parcialmente abierta, o viceversa. Un trazado típico de la carga frente a la deformación de un elemento con una grieta se muestra en la Fig. 1, como se observa se pueden distinguir varias regiones que reflejan el distinto comportamiento por el que va pasando el material en un ciclo de carga. En la región AB, la grieta está totalmente cerrada y el comportamiento es elástico lineal, entre los puntos CD, la grieta está completamente abierta y el comportamiento es lineal, aunque con mayor flexibilidad debido a la existencia de la grieta, en la última zona de la curva puede aparecer plasticidad produciéndose un aumento de la flexibilidad. La carga de cierre se relaciona con el punto C de la curva, luego el problema se presenta en la determinación de forma fiable del cambio de pendiente producido en ese punto.

Son varios los métodos experimentales que han sido utilizados para la medición de la tensión de cierre. Básicamente se pueden distinguir los que miden la flexibilidad mediante métodos ópticos, o mediante extensómetros, tipo COD o mediante la colocación directa de galgas extensiométricas sobre la superficie del elemento. En la Fig. 2, se representa una probeta CT, en la que se esquematiza la colocación de las

galgas, extensómetros y demás accesorios de medida. Dentro de los medios extensiométricos la colocación de la galga en la cara posterior de la probeta, en probetas CT, obtiene una gran sensibilidad en la medición [6].

Los valores medidos por los distintos autores muestran grandes diferencias y dispersión, obteniéndose incluso datos contradictorios [7]. En el trabajo que se presenta, se mide la tensión de cierre, utilizando una aleación de aluminio, mediante la colocación de galgas extensiométricas en la cara posterior de la probeta, se analizan distintas técnicas que actualmente existen en la literatura, para la determinación de la tensión de cierre a partir del comportamiento carga-deformación, comparándose los resultados obtenidos con ellas, y se propone un proceso diferencial para la determinación de la carga de cierre, obteniéndose unos resultados con una dispersión muy pequeña.

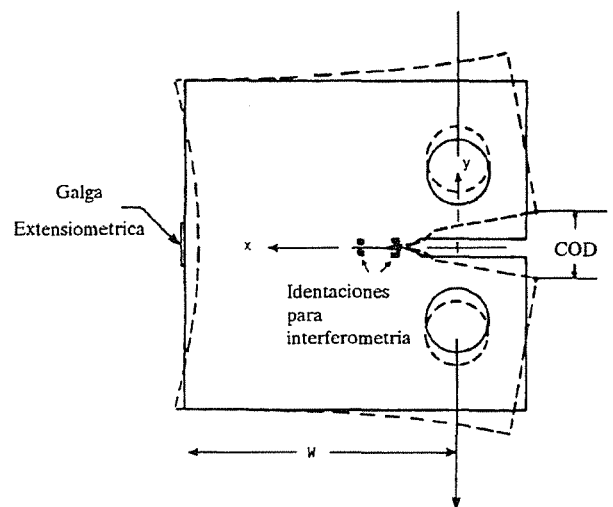


Fig. 2. Esquema de la colocación de extensómetros, e identaciones para las distintas técnicas de medida.

## 2. EQUIPO Y MATERIAL UTILIZADO

La experimentación se ha realizado sobre la aleación de aluminio Al-2024-T351, las probetas utilizadas han sido del tipo 'Compact Tension' (CT), con  $W=50$  mm y 12 mm de espesor, siendo realizados los ensayos con una máquina servohidráulica de lazo cerrado a una frecuencia de 10 Hz. El preagrietado de las probetas hasta obtener una longitud de 5 mm se ha realizado a 10 Hz con una carga de 2000 N de amplitud y 3000 N de valor medio. El control de la longitud de grieta se ha realizado ópticamente. Para medir la deformación se utiliza una galga de 3.2 mm con compensación de temperatura, colocada en la cara posterior de la probeta. La frecuencia de muestreo fue

de 2000 Hz. Tanto la carga como la deformación, son filtrados analógicamente antes de que sean recogidos por el sistema de adquisición de datos. Posteriormente son filtrados digitalmente a 50 Hz paso bajo.

Se realizaron diversos ensayos con valores de R entre 0.1 y 0.33, utilizando en todos los casos carga mínima de 1000 N.

### 3. RESULTADOS

En la figura 3 se representa un lazo completo carga-deformación de los obtenidos en los ensayos. Aparentemente no se observa cambio de comportamiento para bajos valores de la carga, se necesita por tanto de algún proceso que sea capaz de detectar con sensibilidad suficiente, el cambio de comportamiento, debido al cierre y apertura de la grieta.

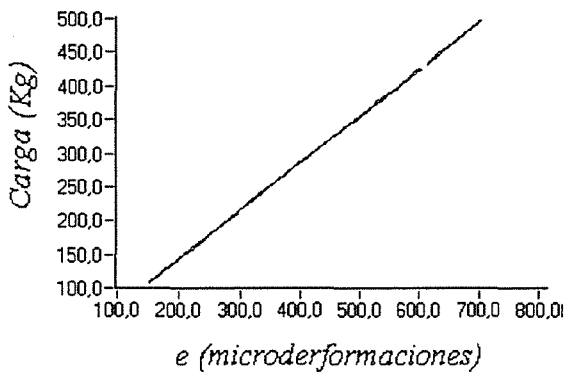


Fig. 3. Trazado carga-deformación medido en los ensayos

Ritchie [8] propone un procedimiento que consiste en determinar el segmento de la gráfica para el cual el ajuste de una recta por mínimos cuadrados produce el máximo coeficiente de correlación. Dicho coeficiente se calcula para el proceso de descarga, partiendo de un punto de la zona alta de la curva y con un número inicial de puntos, se calcula la recta de correlación añadiendo un nuevo punto en cada iteración. El coeficiente de correlación aumenta a medida que aumenta el segmento ajustado hasta un valor de carga a partir del cual disminuye. Dicho valor de la carga correspondería a la carga de cierre. Sin embargo los resultados así obtenidos dependen, como ya comprobó Alison [9], del punto en el que comience el ajuste y de la longitud inicial del segmento a ajustar. En función del valor elegido para estos parámetros puede ocurrir que el factor de correlación calculado sea siempre decreciente, obteniéndose como valor de carga de cierre la más alta primera considerada, o siempre

creciente obteniéndose la carga mínima como tensión de cierre. En la tabla 1 se resumen algunos de estos resultados que ponen además de manifiesto la gran dispersión de resultados obtenidos.

Tabla 1. Influencia de la elección de los parámetros en la obtención de  $P_{cl}$ , en el método de correlación máxima.

Orden punto de inicio	Nº de puntos iniciales	$P_{cl}$
0	15	192
15	15	283
15	10	415
18	15	291

Los datos de la tabla anterior están obtenidos solamente para un ciclo de carga, de donde se pone de manifiesto la poca fiabilidad de éste método.

Diversos autores proponen comparar la curva experimental (P-e) con una recta carga-deformación elástica (P-e'), donde dicha deformación elástica se obtiene multiplicando el valor de la carga por una constante de proporcionalidad  $e' = K \cdot P$ .

Los autores proponen tomar  $K = (de/dt)/(dp/dt)$ , donde la constante K se calcula promediando el valor de las derivadas temporales para valores de P y e entre el 25 y el 85% del rango. En la figura 4, se representa un trazado P-(e-e') donde se observa claramente el cambio de comportamiento. Para valores de carga medios la diferencia de deformaciones es constante (aproximadamente vertical), la rama inferior que se despega hacia la derecha muestra el comportamiento cuando la grieta está totalmente cerrada. Para valores altos de carga (por encima del punto D en la figura 1) dicha diferencia (e-e') muestra que la deformación cambia nuevamente de pendiente.

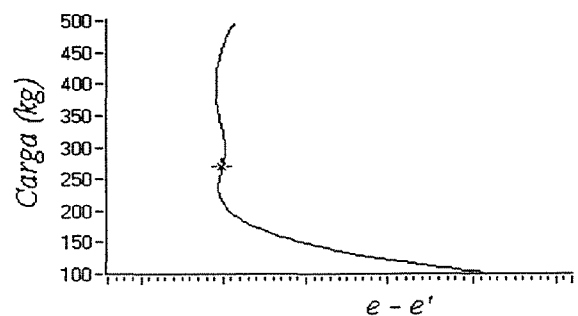
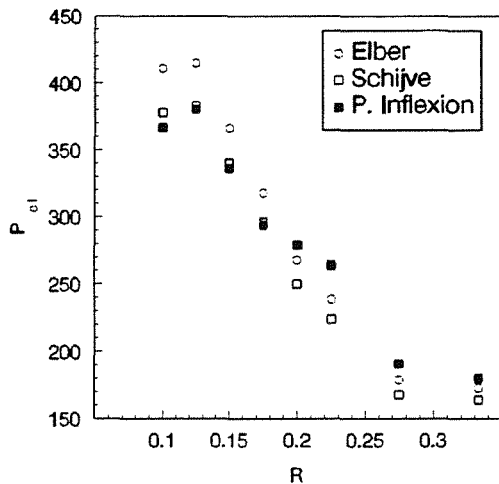


Fig. 4. Curva P-(e-e') donde se marca el punto de inflexión correspondiente a la  $P_{cl}$

Coincidiendo con los resultados obtenidos por otros autores [10,11] la parte vertical no es una línea recta sino que tiene forma de S, el cambio de curvatura en el punto de inflexión marca cuando la flexibilidad comienza a disminuir al comenzar a cerrarse la grieta. El punto de inflexión de esta curva puede tomarse como valor de la carga de cierre.



Las cargas de cierre son calculadas mediante el método propuesto y se comprueba que en este caso el intervalo de carga y deformación adoptados para calcular la constante de proporcionalidad y con ella los valores de  $e-e'$  tiene muy poca influencia en el cálculo del punto de inflexión.

En la figura 5 se muestran los valores medios obtenidos con el método propuesto y los estimados por Elber y Schijve para este mismo material. Como se ve los valores calculados siguen la misma tendencia que la de estos alzando valores muy similares. En la tabla 2 se representan para distintos valores de R la media y desviación estándar ( $\sigma$ ) sobre 30 ciclos de carga. Las desviaciones estándar, como se muestra en la tabla, son inferiores al 6 %. En el método de máxima correlación se han elegido los parámetros de ajuste, en cada caso, que producen las dispersiones mínimas, aún así, entre el 10 % y el 30 % de los valores calculados son superiores a la media en más de un 40 %. Las desviaciones standard que se muestran en la tabla, son obtenidos una vez eliminados estos valores que se separan de la media. Las dispersiones con el método propuesto son sensiblemente mejores que las obtenidas con el de máxima correlación, sobre todo a medida que R aumenta.

#### 4. CONCLUSIONES

El método propuesto muestra una gran sensibilidad en la determinación de las cargas de cierre. Obtiene la carga de cierre de elementos agrietados, incluso donde el cambio de flexibilidad producida por la apertura de grieta es muy pequeña, con dispersiones muy bajas, siendo un método seguro para la determinación de las tensiones de cierre.

**Tabla 2.** Valores de la carga de cierre y desviación estándar, para distintos valores de R y distintos métodos de obtención.

R	Método	$P_{el}$	$\sigma$
0.1	Ref. [1]	411	
	Ref. [2]	378	
	Met.Propuesto	367	13
	Max.Correlación	421	17
0.125	Ref. [1]	415	
	Ref. [2]	383	
	Met.Propuesto	381	16
	Max.Correlación	440	12
0.175	Ref. [1]	318	
	Ref. [2]	296	
	Met.Propuesto	295	14
	Max.Correlación	330	15
0.2	Ref. [1]	268	
	Ref. [2]	250	
	Met.Propuesto	279	7
	Max.Correlación	306	18
0.225	Ref. [1]	239	
	Ref. [2]	224	
	Met.Propuesto	263	6
	Max.Correlación	284	16
0.275	Ref. [1]	178	
	Ref. [2]	168	
	Met.Propuesto	191	6
	Max.Correlación	160	24
0.333	Ref. [1]	173	
	Ref. [2]	164	
	Met.Propuesto	180	10
	Max.Correlación	142	16

Los valores calculados son muy similares a los obtenidos por Elber y Schijve, no obstante sería necesario comprobar con valores de R superiores a 0.33, que es el máximo valor que se ha utilizado. También habría que comprobar la validez para otros materiales.

El método de la máxima correlación, presenta grandes dispersiones, estando además muy influenciado por la elección del número de puntos a ajustar. Este método, se muestra poco eficaz para casos en los que el cambio

de flexibilidad es muy pequeño, como son los casos estudiados.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Investigación Científica y Técnica (DGICYT) la financiación aportada para la realización de este trabajo (PB94-1189-C02).

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- STP 982, 475-488 (1988).
- [11] Nakamura H. y Kobayashi H., " Analysis of fatigue crack closure caused by asperities using the modified Dugdale model", *Mechanics of Fatigue Crack Closure*, ASTM STP 982, 459-474 (1988).
- [1] Elber W., "The significance of fatigue crack closure in fatigue", ASTM STP 486 (1971).
- [2] Schijve J., "Some formulas for crack opening stress level", *Engng Fracture Mech.* 14,461-465 (1981).
- [3] Bachmann V. y Munz D., "Crack closure in fatigue of titanium alloy", *Int J. Fracture* 11,713-716 (1975).
- [4] Chand S. y Garg S. B. L., "Crack propagation under constant amplitude loading". *Engng Fracture Mech.* 21, 1-30 (1985)
- [5] Bell P. D. y Crager M., "Crack growth analysis for arbitrary specimen loading. AFFDL-TR-74-129 (1974).
- [6] Allison J. E., Ku R. C. y Pompetzki M. A., " A comparison of measurement methods and numerical procedures for the experimental characterization of fatigue crack closure", *Mechanics of Fatigue Crack Closure*, ASTM STP 982, 171-185 (1988).
- [8] Hertzberg, R. W., Newton C. H. y Jaccard R., "Crack closure correlation and confusion", *Mechanics of Fatigue Crack Closure*, ASTM STP 982, 139-148 (1988).
- [9] Ritchie R. O., Yu W. Holm D. K. y Blom A. F., "Development of fatigue crack closure with the extension of long and short cracks in aluminum alloy 2124: a comparison of experimental and numerical results", *Mechanics of Fatigue Crack Closure*, ASTM STP 982, 300-316 (1988).
- [10] Chen D. H. y Nisitani H., "Analytical and experimental study of crack closure behavior based on an S-Shaped unloading curve", *Mechanics of Fatigue Crack Closure*, ASTM