

**CORRECCIÓN DE LA TENSIÓN DE CIERRE PARA CARGAS DE AMPLITUD VARIABLE DEL MODELO DE SIMULACIÓN CICLO A CICLO DE NEWMAN**

B. Moreno, J. Zapatero, P. Martín-Lomeña, J. Pascual  
 Área de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica  
 Dpto. de Ingeniería Civil y de Materiales  
 E.T.S.I.I. de Málaga, Plaza del Ejido s/n, 29013 MÁLAGA.

**Resumen.** Los modelos de simulación ciclo a ciclo suelen dar buenas estimaciones cuando se determina la vida de crecimiento de grieta con cargas de amplitud constante, cuando se utilizan para el análisis de crecimiento de grieta con cargas de naturaleza aleatoria las estimaciones no siempre dan tan buenos resultados. En este trabajo se analiza el comportamiento del modelo de simulación de crecimiento de grieta propuesto por Newman, e implementado en el programa FASTRAN II. Se analiza la capacidad del modelo para predecir las vidas de crecimiento de grieta con cargas de amplitud variable. Las comparaciones se realizan con vidas obtenidas experimentalmente para cuatro anchos de banda diferentes, y para la aleación de aluminio 2024-T351. Se propone una modificación de la tensión de cierre para tener en cuenta posibles efectos sobre la misma distintos de la plasticidad inducida.

**Abstract.** In this paper the behaviour of crack growth model proposed by Newman and implemented in the FASTRAN II computer program is analyzed. Capability of the model to predict crack growth life under variable amplitude loads is considered. The results of the simulations are compared with the experimental lives obtained for 2024-T351 aluminium alloy. A modification for crack closure stress estimation with others effects that plasticity-induced, is proposed.

**1. INTRODUCCIÓN**

Muchos componentes y sistemas mecánicos están sometidos a cargas complejas de amplitud variable durante su vida en servicio. Una de las consideraciones importantes en el diseño de tales componentes, es la vida esperada de fatiga. El fallo de componentes críticos puede producir daño a otros componentes y pérdidas de sistemas completos. Una forma de prevenir estas situaciones es mediante inspecciones periódicas, cuyos periodos de inspección son función de la velocidad de crecimiento de grieta.

El análisis de crecimiento de grietas por fatiga se hace normalmente a partir de datos obtenidos en ensayos con cargas de amplitud constante. Sin embargo, las condiciones a que está sometida una estructura real son distintas a las de los ensayos, siendo como se ha dicho de naturaleza aleatoria o cuasi aleatoria.

La extrapolación del conocimiento y de los datos experimentales obtenidos en crecimiento de grietas con carga de amplitud constante a cargas de amplitud variable, es un problema complejo. Unido al desconocimiento real de la secuencia de aplicación de las cargas, las cuales necesitan ser definidas estadísticamente, se une el denominado efecto de secuencia o de interacción de cargas debido a la irregularidad de las mismas. El incremento de grieta en cada incursión de carga esta condicionado por la

historia previa además de por la longitud de la grieta y los valores máximo y mínimo de cada ciclo.

La aplicación de una sobrecarga sobre un elemento sometido a cargas de amplitud constante, produce una disminución de la velocidad de crecimiento de la grieta. Este efecto de retardo está relacionado con la plastificación producida delante de la grieta, y es tenida en cuenta en los análisis de crecimiento de grieta mediante la utilización de valores efectivos de  $\Delta K$ . El concepto de cierre de grieta introducido por Elber [1], permite determinar el valor del factor intensidad de tensiones efectivo como  $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{cl}$ , siendo  $K_{cl}$  el factor de intensidad de tensiones cuando la grieta está completamente abierta. La plasticidad inducida por la sobrecarga, la rugosidad de las superficies de la grieta, o el óxido formado en la superficie de la misma son factores que influyen en el valor de la tensión de cierre [2].

Se utilizan diversas técnicas para medir la tensión de apertura de grieta encontrándose grandes dispersiones e incluso datos contradictorios en las medidas realizadas por distintos autores [3,4]. Este valor, sin embargo, es fundamental en las estimaciones de la vida de crecimiento con cargas de amplitud variable, y su estimación correcta mejorará las predicciones de la vida de crecimiento de grieta.

Las simulaciones para analizar la vida de crecimiento mediante simulación ciclo a ciclo, son ampliamente utilizadas. Estas, permiten simular el comportamiento de una grieta bajo cargas de amplitud variable manteniendo el efecto de secuencia [5-7], y analizar la variabilidad en la vida que se produce al utilizar distintas historias de carga representativas de un mismo proceso. La mayoría de éstos modelos han sido contrastados mediante ensayos con cargas de amplitud constante, así como en algunos casos, con cargas de amplitud variable [8-10]. Con este tipo de cargas se pueden producir errores apreciables, tanto en las determinaciones de vida como en las estimaciones de la variabilidad de la misma. Estos errores son función tanto del registro y de las variables del modelo utilizadas, como de la predicción de la tensión de cierre realizada por el modelo.

En este trabajo, se analiza el comportamiento del modelo de simulación basado en la MFEL propuesto por Newman [7], e implementado en el programa de ordenador FASTRAN II [11]. En este modelo se determina la tensión de cierre considerándola únicamente función de la plasticidad inducida. Se observa que las estimaciones de la simulación, predicen vidas inferiores a las obtenidas experimentalmente para procesos aleatorios estacionarios gaussianos. El trabajo que se presenta, plantea una modificación del modelo para tener en cuenta posibles influencias distintas a la de inducción por plasticidad en la determinación de la tensión de cierre, encontrándose una mejora apreciable en las estimaciones de la vida obtenidas con el modelo.

## 2. ENSAYOS Y SIMULACIÓN

Los ensayos y las estimaciones se realizan sobre la aleación de aluminio 2024-T351, la probeta utilizada es del tipo "Compact Tension" (CT) con un ancho de 50 mm y un espesor de 12 mm, todas las probetas fueron obtenidas de una misma plancha. Para el ajuste de las curvas de crecimiento se utilizaron los datos obtenidos por Lapetra [12] con probetas idénticas a las anteriores, sacadas también de la misma chapa anterior. Estos ensayos se realizaron con  $R=0.2$  ( $P_{min} = 882$  N y  $P_{max} = 4410$  N) y longitudes de grieta:  $a_0 = 17.5$  mm y  $a_f = 25.5$  mm.

Para los ensayos con cargas de amplitud variable se utilizaron cuatro procesos de distinto ancho de banda caracterizado cada uno por el factor de irregularidad  $\varepsilon$ , definido este como la relación entre la frecuencia de cruces con pendiente positiva y la frecuencia de picos. El valor de  $\varepsilon$  varía entre 0 y 1, siendo la banda cada vez más estrecha a medida que  $\varepsilon$  tiende a 1. Los anchos de banda utilizados para éste estudio han sido:  $\varepsilon = 0.85$ ,  $\varepsilon = 0.77$ ,  $\varepsilon = 0.7$  y  $\varepsilon = 0.64$ . Como se ve, el ancho de banda del proceso varía desde una banda relativamente

estrecha ( $\varepsilon = 0.85$ ), hasta una banda ancha ( $\varepsilon = 0.64$ ). Cada historia fue obtenida numéricamente de un proceso estacionario, con una densidad espectral  $S(\omega)$  de tipo bimodal [13]. Las funciones de densidad espectral se han seleccionado de manera que todas tengan la misma varianza.

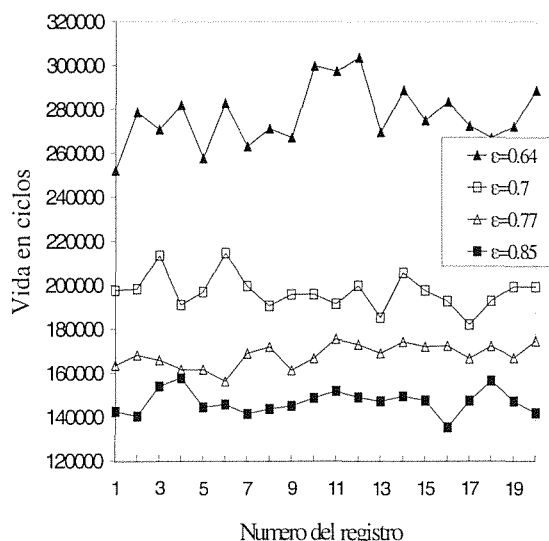


Fig.1. Vidas obtenidas en los ensayos experimentales para los cuatro anchos de banda estudiados.

El número de ciclos de los registros fue de 25000 para todos los anchos de banda estudiados. Se generaron 20 historias para cada uno de los procesos. Con cada una de estas historias se ensayó una probeta y se determinó la vida del ensayo como el número de ciclos que tarda en crecer la grieta, entre una longitud  $a_0 = 15$  mm y  $a_f = 25.3$  mm. El seguimiento de la grieta se ha realizado mediante un sistema de caída de potencial de corriente alterna (ACPD).

La carga media utilizada ha sido de 4850 N y la desviación estándar de 1085 N. En la figura 1 se muestran las vidas obtenidas en los ensayos para los distintos anchos de banda. Como se ve los resultados presentan una gran dispersión, siendo ésta función del ancho de banda del proceso.

Las simulaciones se han realizado con el modelo propuesto por Newman [7]. Este modelo determina la velocidad de crecimiento de grieta según la ecuación:

$$\frac{da}{dN} = C_1 \Delta K_{eff}^{C_2} \frac{1 - \left( \frac{\Delta K_0}{\Delta K_{eff}} \right)^2}{1 - \left( \frac{K_{max}}{C_5} \right)^2} \quad (1)$$

donde

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (2)$$

$$\Delta K_o = C_3 \left( 1 - C_4 \frac{S_o}{S_{max}} \right) \quad (3)$$

Para la aplicación de esta ecuación es necesario conocer los valores de la tensión de cierre, y a partir de ellos determinar los valores efectivos del factor de intensidad de tensiones. Estos valores de la tensión de cierre son estimados por el modelo en función del estado de tensiones tridimensional (tensión o deformación plana). Cada uno de estos estados está caracterizado por un factor de constricción ( $\alpha$ ), que varía entre 1 para tensión plana y 3 para deformación plana. El modelo también permite utilizar un factor de constricción en compresión  $\beta$  distinto del de tracción.

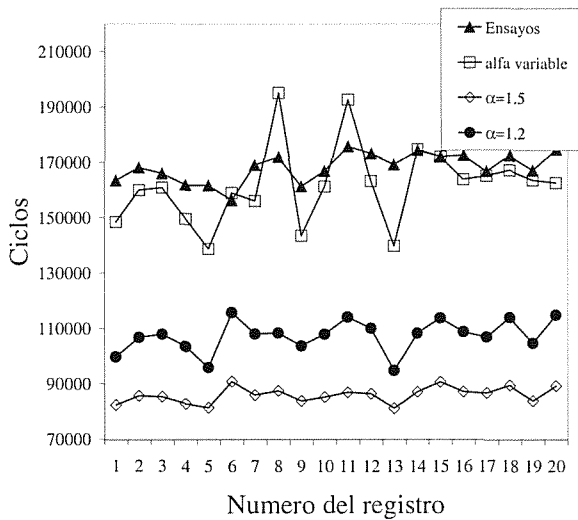


Fig 2. Comparación de las simulaciones y los resultados de los ensayos para  $\epsilon=0.77$ .

### 3. ANALISIS DE RESULTADOS.

De la figura 2 se puede observar que las simulaciones del modelo de Newman reproducen las variabilidades encontradas en los ensayos, aunque los valores de vida obtenidos son casi siempre inferiores a los reales. Sin embargo a medida que  $\alpha$  aumenta, las diferencias entre una u otra simulación se hacen cada vez más pequeños. El uso de un factor de constricción variable permite obtener estimaciones que en valores medios de todos los ensayos para cada proceso, se aproximan a los valores medios de los ensayos, no obstante, la dispersión que presentan estos datos es muy superior a la experimental.

Con los datos de amplitud constante se encuentra que con  $\alpha=1.5$  se consiguen los mejores resultados en el ajuste. El uso de este factor de constricción para la estimación de las vidas de crecimiento en los procesos aleatorios estudiados, obtiene sin embargo estimaciones

medias fuertemente conservadoras, por el contrario la desviación típica de las vidas se aproxima bastante bien a la dispersión de las vidas experimentales. Realizadas diversas simulaciones con distintos valores del factor de constricción, se encuentra que sí la vida media de simulación se aproxima a la de los ensayos, la dispersión por el contrario es muy superior a la experimental. Un estudio exhaustivo ha sido realizado por los autores, para determinar la influencia del factor de constricción en las estimaciones mediante simulación con este modelo [13]. Se encuentra que valores pequeños de  $\alpha$  conducen a mejores estimaciones de vida, con dispersiones en algunos casos muy alejadas de los valores experimentales, y que el valor de  $\alpha=1.2$  corresponde al mejor ajuste con relación a la variabilidad de la vida o dispersión pero con estimaciones muy conservadoras sobre la vida media.

Este valor del factor de constricción  $\alpha=1.2$  es además, un factor demasiado pequeño teniendo en cuenta las dimensiones de la probeta (12 mm de ancho). Con estas dimensiones cabría esperar un factor de constricción más próximo a deformación plana.

Habría que tener en cuenta además, que en los ensayos existen más factores que pueden influir en la dispersión de los resultados (material, máquina, preparación de probeta, tolerancias, temperatura, equipos de medida, etc.), dando sin embargo desviaciones típicas inferiores a las estimadas por el modelo ciclo a ciclo.

Tabla 1. Parámetros estadísticos para el grupo de ensayos.

$\epsilon$	$\mu$			$\sigma$		
	Ensayos	$\alpha$ variab.	$\alpha=1.2$	Ensayo s	$\alpha$ variab.	$\alpha=1.2$
0.64	277166	245646	164495	13726.8	29045.7	11435.6
0.7	197113	190953	129313	7885.2	26260.5	17755.4
0.77	168299	161957	107457	5280.1	14668.0	5856.5
0.85	146972	153003	98042	5502.4	20347.5	6904.3

En la tabla 1 se recogen los valores de la media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ) de los ensayos y de las simulaciones. Como se puede ver de los valores mostrados en la tabla, si los valores medios de vida de simulación se aproximan a los experimentales, la desviación típica, en estos casos, es en algunos casos hasta cuatro veces superior a la de los ensayos, esto supone que para un registro cualquiera la diferencia de vida puede llegar a ser muy distinta a la del ensayo, figura 2.

El modelo determina la tensión de cierre suponiendo que esta es solamente inducida por plasticidad, no obstante otros efectos como, rugosidad u óxido pueden influir en la tensión de cierre. El análisis de las estimaciones obtenidas por simulación, induce a pensar

que la tensión de cierre que el modelo predice para el caso de cargas aleatorias, es inferior a la tensión de cierre producida en la probeta durante el ensayo.

Para corregir las tensiones de cierre calculadas por el modelo ciclo a ciclo e intentar mejorar las estimaciones del mismo, se simula una carga de amplitud constante igual al valor umbral efectivo ( $\Delta K_{th\text{eff}}$ ). Se observa que el modelo supone crecimiento con esta carga que sin embargo, no debería de existir. La diferencia, por tanto, entre el valor máximo del umbral ( $K_{maxth}$ ) y el factor de intensidad de tensiones correspondiente a la tensión de apertura ( $K_{op}$ ) proporcionada por el modelo, se toma como valor de corrección para la determinación del  $\Delta K_{eff}$  calculado por el FASTRAN II. Se define un incremento del factor de intensidad de tensiones de corrección  $\Delta K_{corr}$ , como:

$$\Delta K_{corr} = K_{maxth} - K_{op} \quad (4)$$

Utilizando esta corrección se ajustan nuevamente los parámetros de la ecuación de crecimiento del modelo,  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  y  $C4$  ecuaciones (1) y (3). Con estos nuevos parámetros se vuelve a realizar simulaciones ciclo a ciclo para distintos valores del factor de constricción.

Tabla 2. Parámetros estadísticos de los ensayos y las simulaciones con la modificación propuesta.

$\epsilon$	$\mu$		$\sigma$	
	Ensayos	Propuesto	Ensayos	Propuesto
0.64	277166	276096	13726.8	14765.0
0.7	197113	188685	7885.2	11544.6
0.77	168299	161530	5280.1	7662.9
0.85	146972	142609	5502.4	9067.5

Se encuentra que los valores de las vidas medias y las dispersiones obtenidas mediante la corrección de la tensión de cierre propuesta, se acercan más a las obtenidas en los ensayos que las del modelo sin modificar. Con esta modificación el factor de constricción que mejor se ajusta en las simulaciones es  $\alpha=1.5$ , en lugar de  $\alpha=1.2$ . Aún siendo todavía el factor de constricción un valor demasiado pequeño, se aproxima más al estado de tensiones que debe de tener la probeta utilizada.

En las figuras 3 y 4 se muestran las estimaciones con la modificación propuesta para  $\alpha=1.5$ , junto con los resultados experimentales y las estimaciones del modelo sin modificar para el mismo factor de constricción. Las figuras corresponden a la banda más ancha y más estrecha respectivamente. Como se puede observar en las figuras 3 y 4, y en las tablas 1 y 2, la modificación del modelo permite que las vidas de crecimiento estimadas mediante simulaciones ciclo a ciclo para un mismo valor de  $\alpha$ , se ajusten muy bien a las vidas

obtenidas mediante ensayos para cada registro individual.

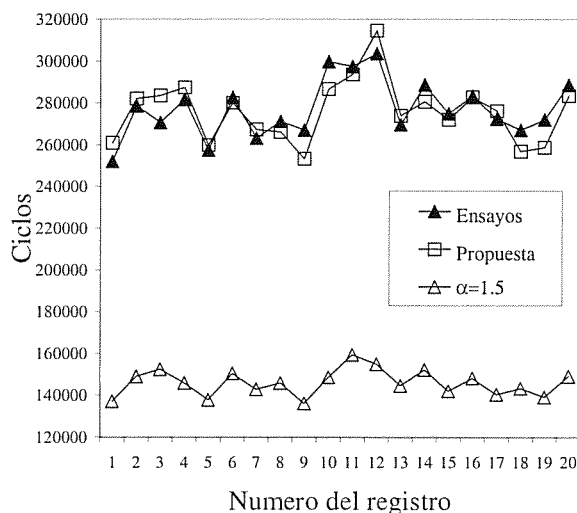


Figura 3. Comparación de las simulaciones con la modificación propuesta y con los datos de ensayo para el ancho de banda  $\epsilon=0.64$ .

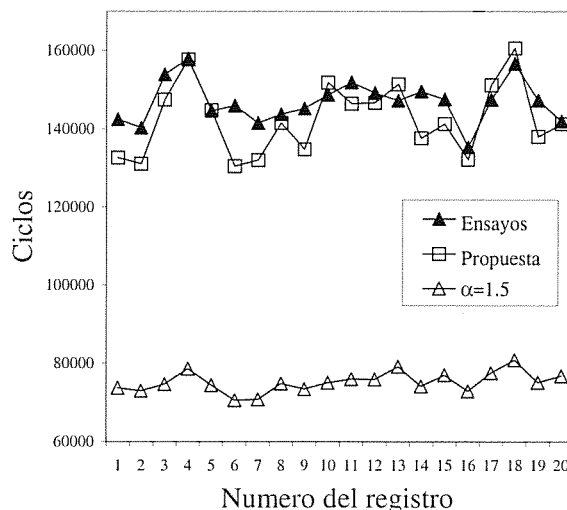


Figura 4. Comparación de las simulaciones con la modificación propuesta y con los datos de ensayo para el ancho de banda  $\epsilon=0.85$ .

La relación vida estimada corregida/vida de ensayos, está entre 0.89 y 1.05 para los 80 casos ensayados. Esta relación para el mismo factor de constricción sin corregir la tensión de cierre está entre 0.43 y 0.65, para los mismos ensayos.

#### 4. CONCLUSIONES

Este trabajo aporta nuevos datos experimentales sobre el crecimiento de grietas bajo cargas de amplitud variable.

De los resultados experimentales y de simulación obtenidos puede concluirse:

1. Mientras para cargas de amplitud constante el modelo estima vidas muy similares a las obtenidas experimentalmente, en cargas de amplitud variable difieren marcadamente. Estas diferencias dependen de los valores de sobrecarga del registro y los usados para los factores de constricción  $\alpha$  y  $\beta$ . La variabilidad de los resultados sin embargo, sigue el mismo comportamiento: los registros que alcanzan mayor vida en ensayo son también los de mayor vida en la simulación.
2. El modelo de simulación ciclo a ciclo propuesto por Newman, reproduce los efectos de secuencia con bastante seguridad, siendo capaz de reproducir la variabilidad como función de cada historia de carga individual.
3. Las estimaciones del modelo mejoran sustancialmente mediante corrección de la tensión de cierre calculada por el modelo.
4. La influencia del ancho de banda en las estimaciones es despreciable. La relación vida estimada/vida experimental, para cada historia y ancho de banda son similares.
5. La tensión de cierre calculada por el modelo de simulación produce resultados muy conservadores, al menos para estimaciones con cargas aleatorias.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Enseñanza Superior e Investigación Científica la financiación aportada para la realización de este trabajo (PB97-1065).

## 7. REFERENCIAS

- [1] Elber W., "The Significance Of Fatigue Crack Closure In Fatigue", ASTM STP 486 (1971).
- [2] J. Domínguez, "Fatigue Crack Growth Under Variable Amplitude Loading", Handbook of Fatigue crack Propagation in Metallic Structures, Andrea Carpinteri (Ed). Pp 955-998, (1994)
- [3] W. Yisengh, J. Schijve. "Fatigue Crack Closure Measurements on 2024-T3 Sheet Specimens", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol. 18, N 9, pp 917-921 (1995)
- [4] J. K. Donald, "Introducing The Compliance Ratio Concept For Determining Effective Stree Intensity", Int. J. Fatigue, Vol. 19, N 1, pp 191-195 (1997)
- [5] Willemborg J. D., Engle R. M. y Wood H. A., "A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept, AFFDL-TM-FBR-71-1 (1971).
- [6] Johnson W. S., "Multi-Parameter Yield Zone Model for Predicting Spectrum Crack Growth", Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading, (Editado por Chang J.B. y Hudson C.M.) ASTM STP 748, 85-102. (1981)
- [7] Newman J. C., "A Crack Closure Model for Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading", Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading, (Editado por Chang J. B. y Hudson C. M.), ASTM STP 748, 53-84. (1981)
- [8] Chang J. B. y Hudson C. M., "Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading", ASTM STP 748, (1981)
- [9] Newman J. C., "Advances in Fatigue Life Prediction", Methodology for Metallic Materials. Theoretical Concepts and Numerical Analysis of Fatigue, (Editado por Blom A.F. y Beevers C.J.), 301-325 (1992)
- [10] Zhang S. J., Döker H., Nowak H., Schulte K. y Trautmann K. H., "Exact Determination of  $\Delta K_{eff}$  and Crack Propagation Prediction for Selected Loading Sequences", Advances in Fatigue Life Predictive Techniques, (Editado por Mitchell M.R. y Landgraf R.W.) ASTM STP 1211, 54-71, (1993)
- [11] Newman J. C., "FASTRAN II-A Fatigue Crack Growth Structural Analysis Program", NASA Tech. Memorandum 104159, NASA Langley Research Center, Hampton, VA. (1992)
- [12] Lapetra C., Mayo J. y Domínguez J., "The Randomness of Fatigue Crack Growth under Constant-amplitude Loads.", Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. 17, 589-600. (1996)
- [13] Zapatero J., Moreno B. y Domínguez J. "On The Use Of The Strip-Yield Model To Predict Fatigue Crack Growth Under Irregular Loading", Fatigue Fract. Engng Mater. Struct., 20, 759-770 (1997).