

EL USO DE MODELOS DE SIMULACION CICLO A CICLO EN LA PREDICCIÓN DEL CRECIMIENTO DE GRIETAS EN FATIGA CON CARGAS ALEATORIAS.

B. Moreno, J. Zapatero, 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. El presente trabajo 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. Se estudia el efecto de la utilización de factores de restricción para considerar distintos estados de tensión. Las comparaciones se realizan con vidas obtenidas experimentalmente para tres anchos de banda diferentes, y para la aleación de aluminio 2024-T351. Se encuentra una fuerte influencia del factor de restricción sobre las vidas de crecimiento en las simulaciones, tanto en las vidas medias como en las dispersiones, así como una fuerte correlación entre las vidas y el valor del pico máximo del registro de carga. La vida media aumenta con el ancho de banda para los mismos niveles de carga.

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 effect of the constraint factors used to consider the stress condition is analyzed. The results of the simulations are compared with the experimental lives obtained for 2024-T351 aluminium alloy. The simulated lives present, a strong influence of the constrain factor. The mean life increase with the broadband of the spectrum.

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.

La determinación de la vida de fatiga de un elemento sometido a cargas de amplitud variable, necesita obtener historias de carga representativas de las variaciones de carga soportadas en servicio por el elemento. Lo anterior, implica definir un registro de cargas de una longitud finita representativo del proceso completo, y repetirlo hasta el fallo. El número de repeticiones hasta el fallo final permitirá estimar la vida del elemento. La elección de esta historia representativa no es tarea fácil [1], pudiendo influir grandemente en las estimaciones de vida.

La vida se puede determinar por medio de ensayos o mediante métodos de simulación, en ambos casos, definidas varias historias, es posible definir como más representativa aquella que obtenga la vida más corta, y así poder determinar la fiabilidad y el error de las estimaciones[2]. Las determinaciones experimentales, son caras y conllevan un gran consumo de tiempo, siendo las estimaciones mediante simulación ampliamente utilizadas. Estas permiten simular el comportamiento de una grieta bajo cargas de amplitud variable, manteniendo el efecto de secuencia [3-5], y analizar la variabilidad en la vida producida por los cambios en la historia de cargas. 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 [6-8]. Para 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 del registro y de las variables del modelo utilizadas.

En este trabajo, se analiza el comportamiento del modelo de simulación basado en la MFEL propuesto por Newman [5], e implementado en el programa de ordenador FASTRAN II [9], estudiándose la capacidad del modelo para predecir crecimientos de grieta (variabilidad y vida media) con cargas de amplitud variable. Se estudia la influencia del factor de restricción elegido para considerar el estado de tensiones (tensión o deformación plana), así como el efecto de la longitud de la historia finita de cargas y de las sobrecargas dentro de cada historia. Las estimaciones que el modelo predice son comparadas con los resultados de ensayos con tres procesos de distinto ancho de banda. Se han generado entre veinte y treinta historias de carga de amplitud variable para cada uno de los tres anchos de banda estudiados. Para cada registro, se han obtenido experimentalmente los ciclos de carga necesarios para crecer una grieta desde una longitud a_0 hasta otra a_f definidas previamente. Los resultados experimentales son comparados con las estimaciones del modelo para las mismas historias de carga.

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 [10] con probetas idénticas a las anteriores, sacadas también de la 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. La ecuación de crecimiento usada es la propuesta por Newman mostrada a continuación:

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

con

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

$$\Delta K_0 = C_3 \left(1 - C_4 \frac{S_0}{S_{max}} \right) \quad (3)$$

Donde ΔK_0 es el rango del factor de intensidad de tensiones umbral, K_{op} es el factor de intensidad de tensiones de apertura de grieta, y C_1 a C_5 son parámetros del modelo.

Los valores de los parámetros obtenidos así como el método de ajuste utilizado, se encuentran con más detalle en la referencia [11].

Para los ensayos con cargas de amplitud variable se utilizaron tres procesos de distinto ancho de banda, caracterizado cada uno por el factor de irregularidad ε , definido como la relación entre la frecuencia de cruces con pendiente positiva y la frecuencia de picos. El valor de ε varía entre 0 y 1, siendo la banda más estrecha a medida que ε tiende a 1. Los anchos de banda utilizados para éste estudio han sido $\varepsilon=0.85$, $\varepsilon=0.77$ y $\varepsilon=0.64$, variando 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 [11]. Las tres funciones de densidad espectral se han seleccionado de manera que todas tengan la misma varianza.

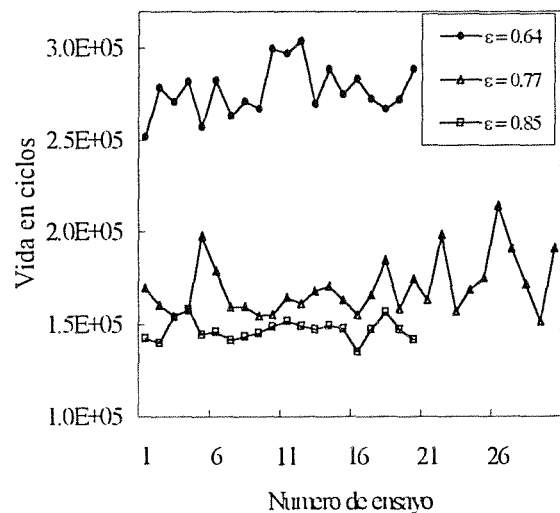


Fig.1. Vidas obtenidas en los ensayos experimentales para los tres anchos de banda.

El número de ciclos de los registros fue, de 5000 para el ancho de banda $\varepsilon=0.77$ y de 25000 para los otros dos. Se generaron 30 historias para el ancho de banda $\varepsilon=0.77$, y 20 para cada uno de los otros procesos. Con cada una de estas historias se ensayó una probeta, determinando 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).

Todos los ensayos se han realizado con una carga media de 4850 N, y una 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. Esta dispersión

es fundamentalmente función de la carga. En un trabajo anterior se determinó la dispersión debida al material y al entorno (maquina de ensayo, temperatura, tolerancia de probetas, etc.), encontrándose que la dispersión debida a las cargas es mucho más alta que la debida al resto de variables [2].

Las simulaciones se han realizado con el modelo propuesto por Newman. Este modelo determina la velocidad de crecimiento de grieta según la ecuación (1). 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 (α), que varía entre 1 para tensión plana y 3 para deformación plana. El modelo permite considerar estados de tensión diferentes en la carga y en la descarga, utilizando otro factor de constricción (β) para la descarga.

Para ajustar estos parámetros en el modelo, se han utilizado los datos de amplitud constante y las cargas de ancho de banda $\varepsilon = 0.77$, se ha utilizado este ancho de banda por ser intermedio entre los tres utilizados. Para la elección de los parámetros α y β , se ha considerado como fundamental la aproximación a las dispersiones de los ensayos. Con los datos de amplitud constante se encuentra que con $\alpha=1.5$ y $\beta=1$ se consiguen los mejores resultados. Con estos parámetros se encuentra también, que con las cargas de ancho de banda $\varepsilon = 0.77$, la dispersión está muy próxima a la obtenida en los ensayos con estas mismas cargas. El efecto de los factores de constricción sobre las estimaciones de crecimiento de grieta en el modelo de Newman, es muy acusado, siendo por tanto de gran importancia la elección correcta de estos parámetros.

3. ANALISIS DE RESULTADOS.

Para estudiar la bondad del modelo en la estimación del proceso de crecimiento de grieta, se han simulado con las mismas cargas todos los casos ensayados, con distintos factores de constricción α y β . Se han utilizado valores de α desde 1.2 hasta 2.3, es decir desde estados próximos a tensión plana hasta próximos a deformación plana. Del factor β se han usado valores entre 1 y 1.5. La influencia de la elección de estos parámetros en las determinaciones de la vida de crecimiento se estudian a continuación.

Efecto de los parámetros del modelo de simulación.

La tabla 1 muestra los valores de vida media (μ_N) y dispersión (σ_N) obtenidas tanto de los resultados de

ensayos como de las simulaciones realizadas con distintos valores de los parámetros alfa y beta, para las 30 historias de carga con ancho de banda 0.77.

Tabla1. Vidas medias (μ) y desviaciones típicas (σ) obtenidas por simulación para las cargas de ancho de banda $\varepsilon=0.77$

Parámetros del modelo		Vida media	Desviación estándar
β	α	μ_N	σ_N
1	1.2	116508	24466
	1.3	107254	22993
	1.5	91644	15459
	1.7	83202	6107
	1.9	82521	3751
	2.1	84017	2538
	2.3	88400	1568
1.3	1.5	145332	41231
	1.7	117253	29540
1.4	1.5	175518	50599
1.5	1.7	166864	51743
	1.9	128012	35600
Ensayos		169969	15272

Como puede observarse de la tabla 1, para un valor constante del parámetro β , tanto la vida media (μ_N) como la dispersión (σ_N) disminuyen a medida que aumenta el valor del parámetro α . Aunque las estimaciones de vida se ajustan mejor a los resultados experimentales para valores bajos de α , los valores de dispersión resultan muy superiores a los reales, siendo las vidas medias estimadas siempre inferiores a las ensayadas. Así, para $\beta=1$, la vida media varía de 116508 ciclos para $\alpha=1.2$ a 88400 ciclos para $\alpha=2.3$, a cambio la desviación típica se reduce desde 24466 ciclos ($\alpha=1.2$) hasta los 1568 ciclos ($\alpha=2.3$). En la figura 2 se muestran algunos de estos resultados.

La dispersión obtenida para $\beta=1$ y $\alpha=1.5$ es la que mejor se ajusta a los resultados experimentales, al mismo tiempo dicho valor de α coincide con el que produce mejor ajuste entre la ley de crecimiento y los valores obtenidos en los ensayos con carga de amplitud constante, produciendo la mejor estimación tanto de vida media como de dispersión. Adoptándose este como el más apropiado para representar las dimensiones de la probeta y el nivel de cargas. Puede concluirse que el modelo es válido para estimar con mucha aproximación la variabilidad de la vida.

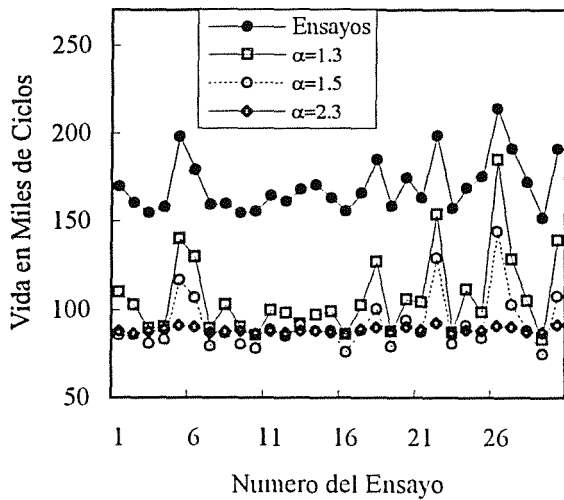


Fig 2. Comparación de las simulaciones y los resultados de los ensayos para $\varepsilon=0.77$ y $\beta=1$

De la figura 2 se puede observar, que las simulaciones del modelo de Newman (para $\beta=1$) reproducen las variabilidades encontradas en los ensayos, aunque los valores de vida obtenidos son siempre inferiores a los reales. Sin embargo a medida que α aumenta, las diferencias entre una u otra simulación se hacen prácticamente imperceptibles. Valores más altos del parámetro β aumenta las vidas medias, ver figura 3, sin embargo el efecto de dispersión se hace mucho más acusado.

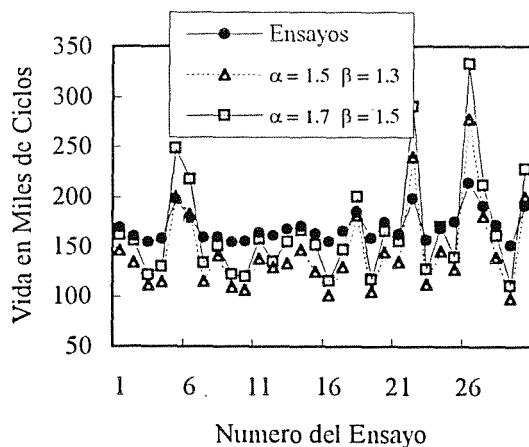


Fig.3. Comparación de las simulaciones y los resultados de los ensayos para $\varepsilon=0.77$ y $\beta=1.3$ y 1

De los datos de la tabla 1 puede verse como para $\beta=1.3$ y $\alpha=1.5$, la dispersión aumenta del orden de 2.6 veces comparada con el valor de $\beta=1$. Este análisis de resultados sugiere que mientras valores altos del parámetro β pueden arrojar mejores resultados sobre el valor de vida estimada el grado de aproximación sobre

la variabilidad de dicha vida disminuye resultando valores excesivamente altos sobre la dispersión de los mismos. 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.

Los valores obtenidos por simulación con las 20 historias de carga correspondientes al proceso aleatorio de banda más ancha ($\varepsilon=0.64$) conducen a idénticas conclusiones. Los resultados de la tabla 2 muestran como valores pequeños de α conducen a mejores estimaciones de vida, con dispersiones muy alejadas de los valores experimentales, y como el valor de $\alpha=1.5$ corresponde al mejor ajuste en relación a la variabilidad de la vida o dispersión pero con estimaciones muy conservadoras sobre la vida media.

Tabla 2. Valores de ensayos y de simulaciones par el ancho de banda $\varepsilon=0.64$.

Parámetros del Modelo		Vida media	Desviación estándar
β	α	μ_N	σ_N
1	1.2	166336	20482
	1.5	148701	16872
	1.7	135113	6584
Ensayos		277165	13379

La tabla 3 muestra los valores de vida media (μ_N) y dispersión (σ_N) obtenidas tanto de los resultados de ensayos como de las simulaciones con $\beta=1$ y $\alpha=1.5$ para los tres procesos aleatorios, anchos de banda $\varepsilon=0.85$, $\varepsilon=0.77$ y $\varepsilon=0.64$. Como conclusiones generales puede verse que tanto los valores de ensayo como los obtenidos numéricamente muestran grandes variaciones de la vida media con el ancho de banda aumentando a medida que aumenta éste. Sin embargo las dispersiones no muestran una tendencia clara en los valores obtenidos experimentalmente. En cuanto a los obtenidos por simulación, pese a que las dispersiones aumentan con el ancho de banda, en cuanto al valor de número de ciclos, no así el coeficiente de variación (σ_N/μ_N) que aumenta de 0.0537 a 0.1687 al disminuir el ancho de banda de 0.85 a 0.77, mientras que disminuye a 0.1135 al considerar ancho de banda 0.64. Este hecho puede estar condicionado por haber empleado registros de 5000 ciclos de longitud en el caso de $\varepsilon=0.77$, a diferencia de los 25000 empleados con los otros dos espectros.

Tabla 3. Valores de vida y desviaciones típicas de simulaciones para $\alpha=1.5$ y $\beta=1$ y ensayos.

Ancho Banda	Vida media μ_N		Desviación estándar σ_N	
	Ensayos	Simulación	Ensayos	Simulación
$\epsilon=0.85$	146972	75104	5363	4032
$\epsilon=0.77$	169969	91644	15272	15459
$\epsilon=0.64$	277166	148701	13379	16872

A la vista de los resultados para ($\alpha=1.5$ y $\beta=1$), se puede observar como la relación vidas simuladas/ensayos está entre 0.51 ($\epsilon=0.85$) y 0.54, para los otros dos casos. La dispersión obtenida en las simulaciones se ajusta peor a los resultados experimentales, tanto en el proceso de banda más estrecha ($\epsilon=0.85$), aproximadamente un 25% inferior a la real, como en el proceso de banda más ancha ($\epsilon=0.64$), del orden de un 26% superior a la real.

Efecto de la carga máxima del registro.

En los procesos de cargas aleatorias, el efecto de las sobrecargas entre distintos registros varía en función de la secuencia de cargas del mismo. También la longitud del registro puede condicionar la influencia del valor máximo de carga sobre la vida del componente. En las historias de carga cortas, que se repiten indefinidamente hasta el fallo, una sobrecarga puede tener efectos importantes en la historia de ciclos, al repetirse inmediatamente después de que sus efectos hayan cesado o mientras aún afectan al crecimiento.

Para analizar esta influencia se ha obtenido el factor de correlación (ρ) entre la carga máxima y la vida para los distintos registros en los tres procesos de carga considerados. En la figura 4 se representan las vidas frente al valor de la carga del pico máximo de cada registro para los anchos de banda utilizados. El factor de correlación así obtenido es de $\rho=0.68$ para $\epsilon=0.64$, $\rho=0.96$ para $\epsilon=0.77$, y $\rho=0.72$ para $\epsilon=0.85$.

Para el caso de la banda intermedia en que las correlaciones son más altas, si se consideran en lugar de los valores de vida experimentales los obtenidos de la simulación numérica con $\beta=1$ y $\alpha=1.5$ dicho factor es de 0.93. Estos datos revelan un fuerte efecto de retardo producido por el valor extremo de cada historia que introduce un efecto artificial de secuencia debido a la repetición indefinida de dicha secuencia de cargas en cada ensayo. En este caso la longitud de los registros utilizada para los ensayos fue de 5000 ciclos frente a los 25000 empleados para los otros registros de los

procesos caracterizado por $\epsilon=0.85$ y $\epsilon=0.64$. Estos resultados sugieren que el efecto de la carga máxima es más acusado en el caso del uso de registros cortos que largos como demuestra el mayor factor de correlación para aquellos, pero que también está influenciado por el tipo de carga siendo su efecto mayor en procesos de banda estrecha que en aquellos de banda ancha.

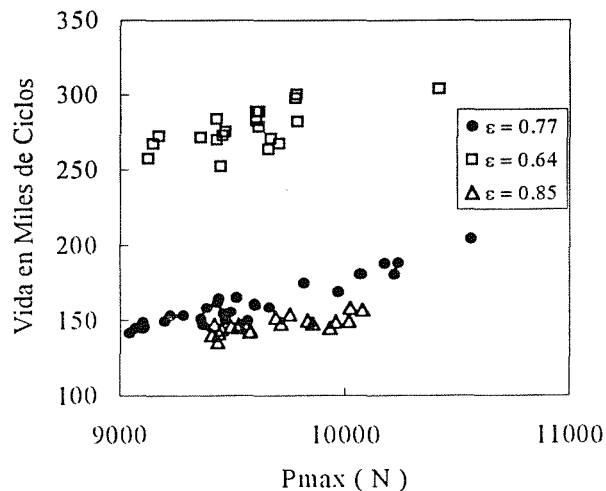


Fig 4. Vidas frente al valor extremo del registro

4. CONCLUSIONES

Este trabajo aporta nuevos datos experimentales sobre el crecimiento de grietas bajo cargas de amplitud variable, contribuyendo a determinar la influencia que el uso de diferentes historias de carga representativas del mismo proceso tiene sobre el crecimiento. La comparación entre los resultados obtenidos de los ensayos y las estimaciones numéricas realizadas, permiten analizar la capacidad del modelo propuesto por Newman para predecir la vida a fatiga.

De los resultados experimentales obtenidos puede concluirse:

1. El ancho de banda del proceso determina fundamentalmente la vida media. Para el mismo nivel de carga, la vida aumenta con el ancho de banda del proceso.
2. El uso de registros de longitud finita produce un efecto de secuencia haciendo que la carga máxima del registro, debido a los efectos de retardo que produce, tenga una enorme influencia en la vida. Se ha encontrado que la correlación entre la vida y el valor de carga máxima del registro es mayor en los registros de menor longitud.

3. Dicha correlación entre vida y carga máxima del registro es mayor en los procesos de banda estrecha que en los de banda ancha.

De los resultados obtenidos de las simulaciones en base al modelo de Newman, se ha encontrado que si bien el modelo reproduce los efectos de las sobrecargas y su secuencia con precisión y es posible la estimación de la variabilidad de la vida de crecimiento en función de la historia de carga, los resultados de vida son muy conservadores. Estas conclusiones pueden puntualizarse en:

1. Mientras para cargas de amplitud constante el modelo estima vidas muy similares en las simulaciones 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 α y β . 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. La dispersión de los resultados obtenidos con el modelo está altamente influenciada por los valores de los parámetros α y β . Los valores de estos parámetros que aproximan con más exactitud las vidas medias, presentan dispersiones bastante más altas que las encontradas experimentalmente.
3. Los valores de vida estimados con $\alpha=1.5$ y $\beta=1$ están muy por debajo de los experimentales mientras que la variabilidad se reproduce con bastante aproximación.
4. De los resultados se puede decir, que para cualquier factor de constricción aunque las predicciones son buenas con respecto a la media, el resultado de una simulación particular puede ser grandemente conservativo, dependiendo del pico máximo del registro de cargas utilizado.

5. REFERENCIAS

[1] Ten Have A. A., "European Approaches in Standard Spectrum Development", Development of Fatigue Loading Spectra, (Editado por Potter J. M. y Watanabe R. T.) ASTM STP 1006, 17-35 (1989).

[2] Domínguez J., Zapatero J. y Pascual J., "Effect of load Histories on Scatter of Fatigue Crack Growth in Aluminum Alloy 2024-T351". Engng. Fract. Mechs. 56, 65-76, (1997).

[3] 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).

[4] 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)

[5] 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)

[6] Chang J. B. y Hudson C. M., "Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading", ASTM STP 748, (1981)

[7] 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)

[8] Zhang S. J., Döker H., Nowak H., Schulte K. y Trautmann K. H., "Exact Determination of ΔK_{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)

[9] Newman J. C., "FASTRAN II-A Fatigue Crack Growth Structural Analysis Program", NASA Tech. Memorandum 104159, NASA Langley Research Center, Hampton, VA. (1992)

[10] 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)

[11] 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).