

SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO DE GRIETAS POR FATIGA BAJO CARGAS ALEATORIAS CON NASGRO

B. Moreno¹, J. Zapatero¹, P. Lopez-Crespo¹ and J. Domínguez²

¹ Area de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica
E.T.S. de Ingenieros Industriales, C/ Pedro Ortiz Ramos s/n
Universidad de Málaga, 29071. España
E-mail: bmoreno@uma.es, jzapatero@uma.es, plopezcrespo@uma.es

² Departamento de Ingeniería Mecánica
ESI, Camino de los Descubrimientos s/n
Universidad de Sevilla, 41092. España
E-mail:jaime@us.es

RESUMEN

En este trabajo se hace uso del strip-yield model implementado en el software NASGRO para estimar el crecimiento de grietas bajo cargas aleatorias. Los resultados de simulación son comparados con resultados experimentales previamente obtenidos por los autores. Se dispone de los resultados de un total de 140 ensayos de crecimiento de grietas con registros de carga de amplitud variable correspondientes a cuatro procesos aleatorios gaussianos realizados sobre probetas tipo CT de la aleación de aluminio 2024-T351. Además de estos ensayos, para caracterizar el comportamiento a fatiga del material y ajustar los parámetros del modelo, se han realizado tandas de tres ensayos con carga de amplitud constante para distintas relaciones de carga ($R=0.1, 0.3, 0.5$ y 0.7). En este trabajo se analiza el procedimiento de ajuste de los parámetros del modelo, estudiando la influencia de dichos parámetros en los resultados de simulación con cargas aleatorias así como la capacidad del modelo de representar el proceso de crecimiento.

ABSTRACT

This work uses the strip-yield model implemented in NASGRO computer to estimate fatigue crack growth under variable amplitude loading. The simulated results were compared with experimental data previously obtained by the authors. A substantial number of fatigue crack growth analysis were carried out using variable amplitude load histories, corresponding to four stationary Gaussian random processes, on CT specimens of aluminium alloy 2024-T351. Crack growth tests under constant amplitude loading at four different stress ratios ($R=0.1, 0.3, 0.5$ and 0.7) were carried out to characterize the fatigue crack growth behaviour of the studied material and adjust the model parameters. The effect of the fitted parameters on the simulation results as well as the capability to represent the crack growth process are analysed.

KEY WORDS: fatigue crack growth, fatigue under random loading, strip yield model

1. INTRODUCTION

Para el diseño a fatiga de numerosos componentes mecánicos, especialmente aquellos con diseño basado en tolerancia al daño, es fundamental predecir el comportamiento de las grietas durante el crecimiento por fatiga. Los modelos empleados para ello deben ser capaces de predecir el crecimiento ante cualquier ley de variación de carga que sufra el sistema en la realidad. Desde hace muchos años se han propuesto diversos modelos para predecir el comportamiento de grietas sometidas a cargas de variación irregular o aleatoria [1-5]. Dichos modelos deben ser capaces de predecir el

efecto de las sobrecargas y, en general, el efecto de secuencia.

Entre los modelos de predicción, probablemente el grupo más extendido actualmente, especialmente en la industria aeronáutica, es el de los basados en el cierre de grieta. De los distintos procedimientos propuestos para calcular el cierre de grieta, el más difundido es el basado el Strip Yield Model (SYM) propuesto por Newman [5]. Dicho modelo se emplea para determinar la evolución de las tensiones de cierre, al mismo tiempo que definen una ley de crecimiento de grieta en función del factor de intensidad de tensiones efectivo, ΔK_{eff} . Los parámetros del modelo y de la ley de crecimiento es

necesario ajustarlos a partir de velocidades de crecimiento obtenidas experimentalmente con cargas de amplitud constante y variable a diferentes niveles de carga y relación de tensiones.

En este trabajo se presenta un análisis del modelo implementado en el código comercial NASGRO [6]. Se analiza la influencia de los parámetros de ajuste del modelo sobre los resultados de simulación, así como la capacidad del modelo para predecir el crecimiento de grieta bajo cargas aleatorias comparando los resultados de simulación con los resultados experimentales obtenidos previamente por los autores.

La organización del artículo es como sigue. En primer lugar se presentan los resultados experimentales de los ensayos realizados, que servirán para ajustar el modelo. A continuación se comentan brevemente las características del modelo y se presentan los ajustes de parámetros realizados y la influencia de estos en los resultados obtenidos. Finalmente se obtienen algunas conclusiones.

2. MATERIAL Y ENSAYOS

Para la caracterización del comportamiento del material a fatiga se han llevado a cabo ensayos de crecimiento de grietas bajo cargas de amplitud constante (CA) para cuatro relaciones de carga ($R=P_{\max}/P_{\min}$): $R=0.1, 0.3, 0.5$ y 0.7 . Se han realizado tres ensayos diferentes para cada valor de R . El material de ensayo es la aleación de aluminio Al-2024-T351 ensayado con probetas tipo CT de 50 mm de ancho y 12 mm de espesor. La longitud de grieta se ha medido haciendo uso del método de caída de potencial con corriente alterna (ACPD). La velocidad de crecimiento se ha calculado de acuerdo al procedimiento descrito en ASTM E647, los resultados de dichos ensayos se muestran en la figura 1.

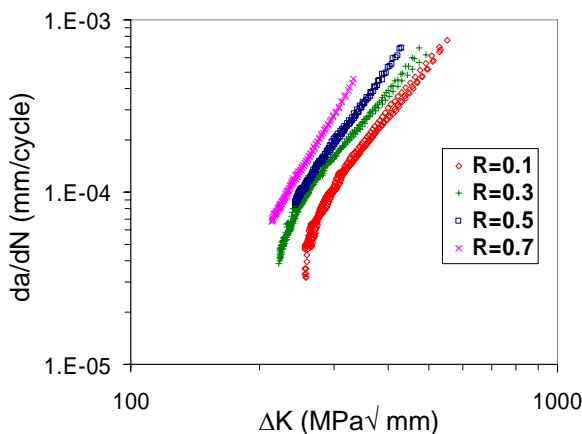


Figura 1. Resultados de los ensayos con carga de amplitud constante.

Para la validación del modelo se emplearán los resultados experimentales obtenidos en 140 ensayos de crecimiento de grieta con carga aleatoria realizados por

los autores [7,8]. Para el mismo material y tipo de probetas se realizaron ensayos empleando en cada caso un registro de carga aleatoria distinto. Cada registro se obtuvo sumando una carga constante a un registro aleatorio representante de un proceso gaussiano de media cero definido por su función de densidad espectral. Se definieron 4 procesos de carga distintos denominados A, B, C y D. Para poder considerar distintos niveles de carga se tomaron dos valores distintos de media cuadrática, denominándose nivel H y L a los niveles de carga alto y bajo respectivamente. Para cada uno de los procesos y niveles de carga, denominados AH, BH, CH, DH, AL, BL y DL, se obtuvieron 20 registros de carga diferentes cada uno con 25000 ciclos. En la tabla 1 se presentan los valores de vida media a fatiga y desviación estándar para todos los procesos.

Tabla 1. Vida media (μ_T) y desviación standard (σ_T) en miles de ciclos para todos los procesos de carga

PROCES O	AH	BH	CH	DH
μ_T	277	197	168	147
σ_T	13,4	7,7	5,1	5,4
PROCES O	AL	-	CL	DL
μ_T	1164	-	691	590
σ_T	35,4	-	17,7	24,5

3. CARACTERISTICAS DEL MODELO

El SYM implementado en Nasgro utiliza la siguiente ecuación de crecimiento:

$$\frac{da}{dN} = C \left[\left(\frac{1-f}{1-R} \Delta K \right) \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_c} \right)^q} \quad (1)$$

Donde C , n , p y q , son parámetros del material a ajustar, $R = S_{\min}/S_{\max}$ es la relación de tensiones, $f = S_{op}/S_{\max}$ y K_c , K_{th} son el factor de intensidad de tensiones crítico y umbral respectivamente.

Para tener en cuenta el estado de tensiones se hace uso del concepto de factor de constricción. Nasgro permite dos opciones distintas de cálculo. En la opción denominada VCL (variable constraint-loss option), el modelo usa un factor de constricción a tracción variable a lo largo de los elementos de la zona plástica, que además es calculado por el programa en base a la relación entre el tamaño de zona plástica y el espesor de la probeta. No obstante, el usuario debe definir el parámetro α_{new} , relación entre el factor de constricción a tracción en el borde de grieta y el factor de constricción a compresión. Una segunda opción, denominada CCL (constant constraint-loss option), usa un factor de

constricción a tracción constante a lo largo de los elementos de la zona plástica, que es definido por el usuario. El estudio presentado en este trabajo se ha realizado usando la opción VCL.

NASGRO realiza la simulación con el siguiente esquema: recibe como entrada los datos y geometría del material, los parámetros ajustados de la ecuación de crecimiento y los registros de carga aplicados, usando el Strip Yield Model determina las tensiones de cierre a partir de las cargas aplicadas y simula el crecimiento de la grieta para cada ciclo o conjunto de ciclos.

4. AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DE CRECIMIENTO.

El software dispone de un módulo de cálculo (matgui) que permite ajustar la ecuación (1) a un conjunto de datos $da/dN-\Delta K$. El ajuste obtiene los valores de C y n , para un conjunto de parámetros (p , q , ΔK_{th} y K_C) fijados de antemano. Nasgro provee para una amplia variedad de materiales una base de datos con información sobre factores de intensidad de tensiones umbrales y críticos que junto a ecuaciones empíricas permiten obtener ΔK_{th} y K_C . Para evaluar la función f en este módulo de ajuste se usa la función propuesta por Newman [9]:

$$\frac{S_0}{S_{max}} = A_0 + A_1 R + A_2 R^2 + A_3 R^3$$

$$A_0 = (0.825 - 0.34\alpha + 0.05\alpha^2) [\cos(\pi S_{max}/2\sigma_0)]^{1/\alpha}$$

$$A_1 = (0.415 - 0.071\alpha) S_{max}/\sigma_0$$

$$A_2 = 1 - A_0 - A_1 - A_3$$

$$A_3 = 2A_0 + A_1 - 1$$

Donde α representa el factor de constricción que es tratado como una constante con el único propósito de ajustar las curvas de crecimiento.

Además de los parámetros de la ecuación de crecimiento, el modelo necesita de otros para su simulación: el parámetro α_{new} comentado previamente y otros parámetros ΔS_{max} y N_{max} que controlan la actualización de la tensión de cierre. Bajo cargas de amplitud constante, el valor de la tensión de cierre se mantiene en un valor estabilizado por lo que no es necesario actualizar su valor en cada ciclo, sin embargo, bajo cargas aleatorias, la frecuencia con la que la tensión de cierre es actualizada tendrá mucha influencia en el efecto de las sobrecargas.

5. INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE AJUSTE DEL MODELO

Haciendo uso del módulo matgui, para el ajuste de la ecuación de crecimiento a los datos experimentales obtenidos con carga de amplitud constante, se ha observado que ningún valor de α permite obtener un ajuste satisfactorio para todos los valores de R . Se obtiene una pobre correlación entre los resultados

obtenidos por simulación y los valores reales de vida obtenidos experimentalmente con cargas de amplitud constante. Estos resultados concuerdan por los obtenidos por otros autores [10] también en aleaciones de aluminio. Un inconveniente de este módulo de cálculo es que tan sólo proporciona una representación gráfica conjunta de da/dN frente a ΔK para los datos experimentales y los obtenidos con el ajuste a la ecuación 1, como se muestra en la figura 2, pero no proporciona ninguna herramienta que permita definir el mejor ajuste. Por otra parte, se ha comprobado que un aparente buen ajuste a datos para un determinado valor de R puede obtenerse con distintos valores del parámetro α y no obstante, esto no garantiza una buena estimación de vida en la simulación.

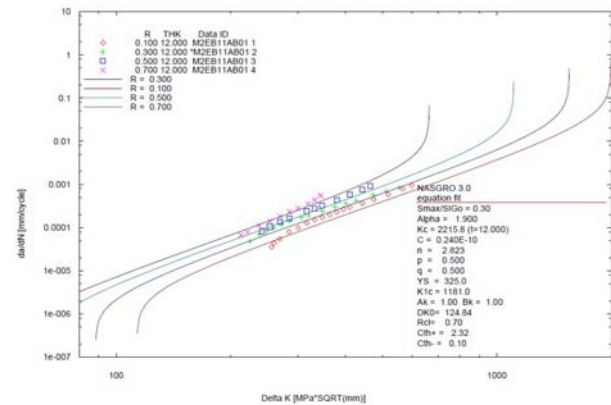


Figura 2. Salida gráfica del módulo de ajuste matgui. (5.15)

Pese a estos resultados, uno de los objetivos de este trabajo es analizar la influencia de los parámetros de ajuste del modelo sobre las estimaciones de vida bajo cargas aleatorias. La eficiencia del ajuste se va a determinar comparando las estimaciones con datos experimentales de crecimiento de grietas con cargas aleatorias. De los veinte ensayos realizados para cada proceso, a efectos de comparación, se han tomado el de mayor y menor vida para el proceso CH, que corresponden a los registros de carga que presentan los mayores y menores efectos de retardo. De esta manera, una correcta estimación del crecimiento en ambos casos garantizará unas buenas estimaciones en todos los demás. Se han realizado ajustes de la ecuación de crecimiento variando: los exponentes p y q , la relación de tensiones R sobre la que se realiza el ajuste, y el factor de constricción α , para estudiar la influencia de estos parámetros en la simulación bajo cargas aleatorias.

Ajustes realizados con valores de p y q muy distintos, apenas producen diferencias en las estimaciones del crecimiento. Variando q desde $q=1$ hasta $q=4$, las diferencias en número de ciclos de vida es menor del 10%.

Por el contrario, ajustar la ecuación de crecimiento a distintos conjuntos de relación de tensiones (R) produce grandes variaciones en la predicción del crecimiento, en la figura 3, se muestra el efecto sobre las estimaciones de la simulación, de la relación de tensiones utilizada en

el ajuste. Se observa que el valor de $R=0.3$ nos proporciona los mejores resultados. Las relaciones de vida (N_{NASGRO}/N_{EXP}) para el proceso CH varían entre 0.82 y 1.23 en función del R ajustado.

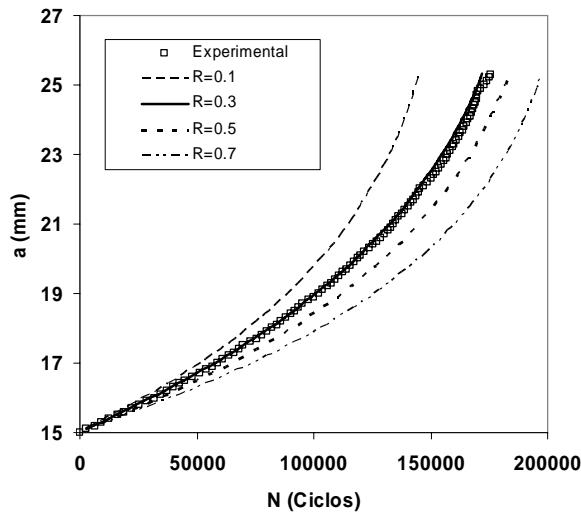


Figura 3. Curva a - N experimental y estimadas usando los parámetros de la ecuación de crecimiento ajustados a distintos conjuntos de relación de tensiones R .

El factor de constricción elegido para el ajuste, influye fuertemente en las estimaciones de la simulación del crecimiento. Este resultado coincide con el obtenido por los autores en trabajos previos realizados haciendo uso del strip yield model implementado en el código FASTRAN propuesto por Newman [11]. Ajustes con factores de constricción desde 1.5 a 3 producen grandes variaciones en las estimaciones de vida, figura 4. En general los mejores resultados se obtienen para altos valores del factor de constricción, encontrándose que entre $\alpha=2.6$ y $\alpha=2.8$ son los que mejores aproximaciones obtienen para los casos estudiados.

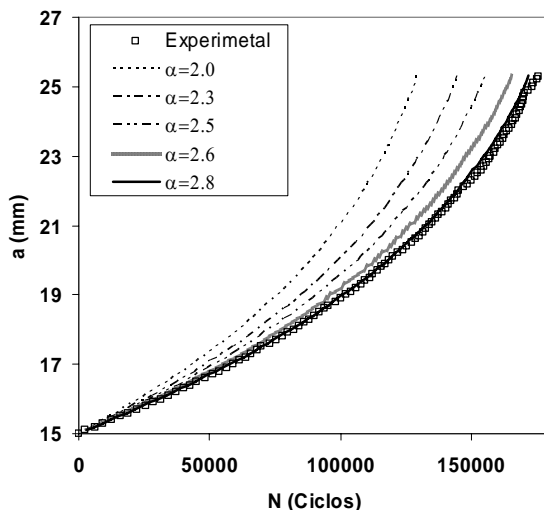


Figura 4. Curva a - N experimental y estimadas usando los parámetros de la ecuación de crecimiento ajustados con distintos valores de α .

Para analizar la influencia de α_{new} se realizan simulaciones con valores entre 1.5 y 2.3. Las

simulaciones comparadas con los datos experimentales muestran un efecto muy pequeño de esta variable, las diferencias en número de ciclos de vida es inferior al 5%.

Como se ha comentado, el uso del modelo para cargas de amplitud variable, está muy influenciado por la frecuencia con la que se estima el valor de la tensión de cierre. En estos casos, el manual indica que un análisis ciclo a ciclo podría ser una elección segura pero con un consumo de tiempo de computación más alto. El software contiene dos parámetros adicionales, ΔS_{max} y N_{max} , que gobiernan el algoritmo de actualización de la tensión de cierre. El primer parámetro, ΔS_{max} , es la diferencia de tensión aplicada desde un pico máximo de carga significativo al siguiente que requiere un nuevo cálculo de la tensión de cierre. Esto asegura que el efecto de las sobrecargas sea tenido en cuenta. El segundo parámetro, N_{max} , es el número máximo de ciclos consumidos entre dos actualizaciones de la tensión de cierre. Esto asegura la actualización en posibles espectros con largos bloques de ciclos de amplitud constante. Para determinar el efecto que estos parámetros ejercen sobre la simulación del crecimiento en procesos aleatorios, se realizan simulaciones permitiendo que ΔS_{max} o N_{max} controlen la actualización de la tensión de cierre.

Para estudiar el efecto de N_{max} , se ha utilizado un valor muy alto de ΔS_{max} para que sea el número de ciclos quien controla la actualización de la tensión de cierre. Se han realizado simulaciones con $N_{max}=1$, $N_{max}=5$, $N_{max}=10$ y $N_{max}=100$, la figura 5 muestra las grandes diferencias de crecimiento estimadas al variar N_{max} . La vida estimada al considerar $N_{max}=10$ es más del doble que al realizar actualizaciones ciclo a ciclo ($N_{max}=1$).

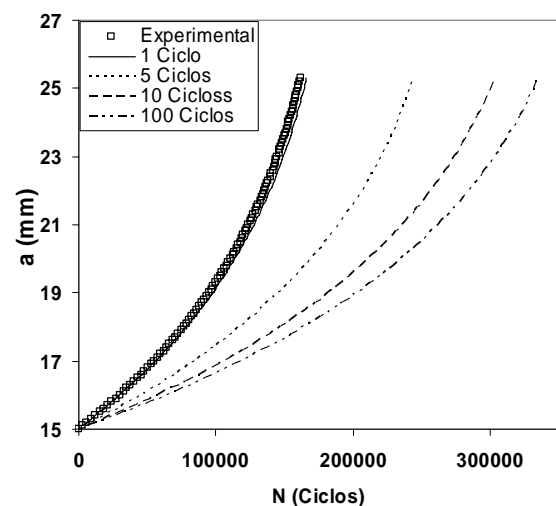


Figura 5. Curva a - N experimental y estimadas usando distintos valores del parámetro N_{max} .

Contrariamente al caso anterior, para estudiar el efecto de ΔS_{max} , se fija un valor muy alto de N_{max} . ΔS_{max} se han tomado como porcentajes de la diferencia entre 1.5 veces la media de picos y la media de los picos del registro de cargas. Los valores de ΔS_{max} utilizados en el

estudio han sido 5%, 10%, 25%, 50% y 100% del incremento definido anteriormente, la figura 6 muestra dichos resultados.

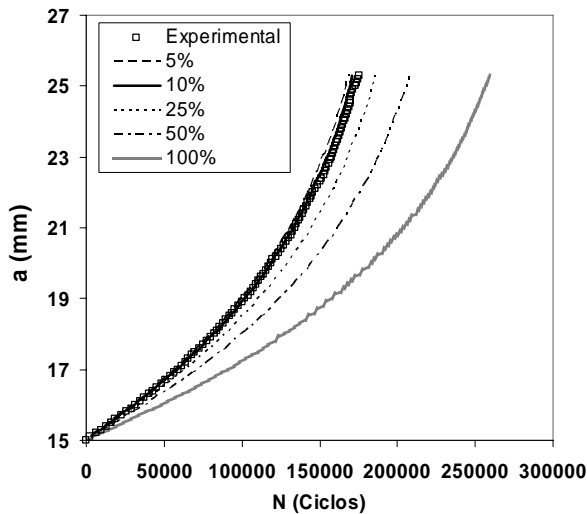


Figura 6. Curva a - N experimental y estimadas usando distintos valores del parámetro ΔS_{max} .

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En base a los resultados obtenidos se puede concluir que el ajuste de los parámetros tiene una gran influencia en los resultados obtenidos en simulación para las cargas aleatorias. El efecto de dichos parámetros sobre los resultados puede explicarse como sigue.

La pequeña influencia del parámetro q se debe a que en ningún caso el crecimiento de grieta se llevó a cabo hasta fractura. Este parámetro influye mucho en la curva de crecimiento en la zona de altos valores de ΔK , pero dichos valores no se alcanzan durante el ensayo. Para valores bajos de ΔK , en la región próxima al umbral, la forma de la curva de crecimiento está controlada por el parámetro p . La poca influencia de este parámetro se debe a que, si bien es cierto que para el proceso de cargas aleatorias hay muchos rangos de carga pequeños, y por tanto bajos valores de ΔK , su contribución al proceso es muy pequeña debido a las bajas velocidades de crecimiento.

La gran influencia del parámetro α y del conjunto de datos de distinto R elegido en el ajuste en el módulo Matgui, se debe a que dichos parámetros modifican la ecuación de crecimiento en la zona intermedia de ΔK , justo en el rango que realmente contribuye al crecimiento de la grieta con las cargas aleatorias del proceso estudiado. Ajustar con un valor bajo de α desplaza las curvas de crecimiento (da/dN vs. ΔK_{eff}) hacia la izquierda, lo contrario ocurriría con un valor alto de α . Por tanto, a un mismo valor de ΔK le corresponden velocidades de crecimiento más altas (dando vidas menores a las experimentales) si el ajuste se realiza con un valor bajo de α que el que le

correspondería si el ajuste se realiza con un valor alto de α (dando entonces vidas mayores), ver figura 4.

La influencia de los parámetros ΔS_{max} y N_{max} queda clara comparando las simulaciones realizadas ciclo a ciclo con las obtenidas para distintos valores de dichos parámetros. El que ejerce mayor efecto en la simulación es N_{max} . Cuánto más vida se consuma sin actualizar la tensión de cierre, el efecto de las grandes sobrecargas predomina, aumentando los efectos de retardo y la vida estimada en la simulación. Para los procesos de carga aquí considerados, la irregularidad de las mismas y la influencia de estos parámetros, muestra claramente que no es posible un cálculo simplificado sino que es necesaria la simulación ciclo a ciclo, es decir, el cálculo o actualización de la tensión de cierre en cada ciclo.

Elegidos los parámetros del modelo que producen para el proceso CH el mejor ajuste a los dos registros de carga, el de máxima y mínima vida, las curvas a - N obtenidas son las que se muestran en la figura 7. Con dichos parámetros se realizan las simulaciones para los 20 registros de carga del proceso CH, la figura 8 representa la relación vida simulada/experimental, con valores entre 0.97 y 1.11 siendo el valor medio de 1.011.

La figura 9, muestra la relación de vidas obtenidas por simulación a vidas experimentales para los 20 registros de cada uno de los siete procesos de carga. A la vista de estos resultados, puede concluirse que ajustados los parámetros del modelo a los resultados de registros bajo cargas aleatorias, las simulaciones para todos los procesos y en los dos niveles de carga arrojan excelentes resultados con relaciones N_{NASGRO}/N_{EXP} entre 0.8 y 1.25.

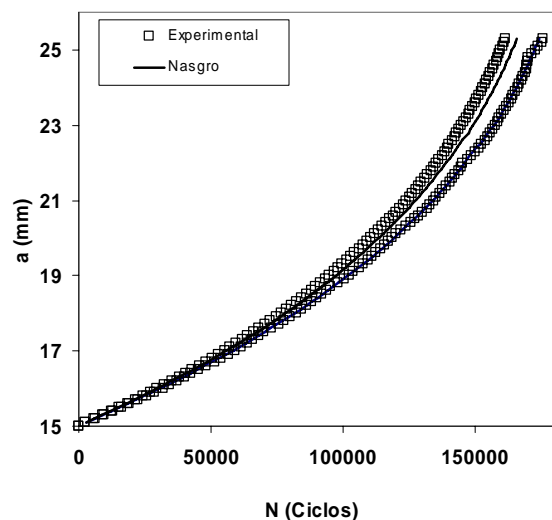


Figura 7. Curvas a - N experimental y estimadas para los registros de máxima y mínima vida del proceso CH.

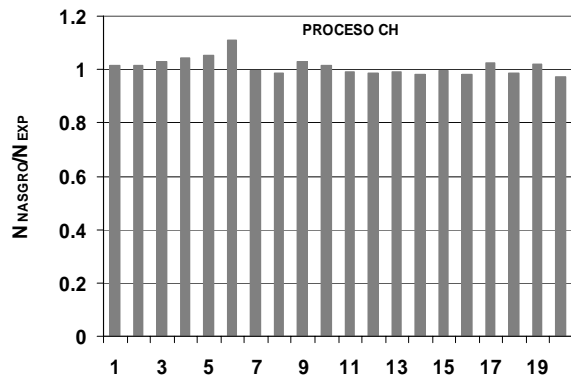


Figura 8. Relación vida estimada (N_{NASGRO}) a vida experimental (N_{EXP}) para los 20 registros del proceso CH.

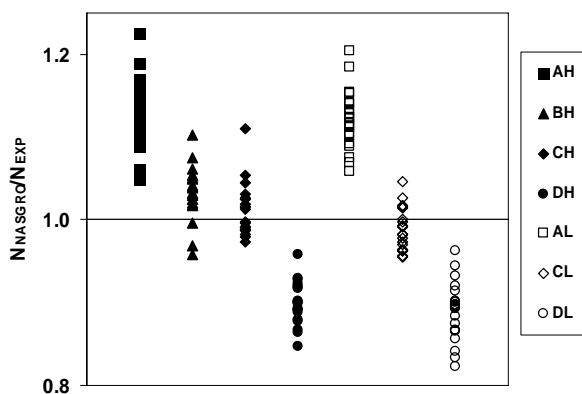


Figura 9. Relación vida estimada (N_{NASGRO}) a vida experimental (N_{EXP}) para los 20 registros de todos los procesos de carga considerados.

7. CONCLUSIONES

Finalmente, como conclusiones pueden destacarse las siguientes:

- El módulo de cálculo para el ajuste de la ecuación de crecimiento no permite obtener un ajuste satisfactorio para los resultados con cargas de amplitud constante para todos los valores de R .
- El factor de constricción usado en el ajuste, tiene una enorme influencia en los resultados obtenidos por el modelo.
- El valor de α_{new} tiene poco efecto en la simulación.
- Las variables que controlan la actualización de la tensión de cierre, ΔS_{max} y N_{max} , tienen mucha influencia en los resultados de simulación obtenidos para cargas aleatorias, justificando el uso necesario de una simulación ciclo a ciclo.
- Si los parámetros del modelo se ajustan para reproducir el crecimiento observado con un registro de cargas aleatorias de un proceso y nivel de carga

concreto, las estimaciones de crecimiento para el resto de procesos en los dos niveles de carga estudiados, son muy buenas.

REFERENCIAS

- [1] Chang JB, Hudson CM. (Eds), *Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading*, ASTM STP 748, 1981.
- [2] Willemborg JD, Engle RM, Wood HA, *A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept*. AFFDL-TM-FBR-71-1, 1971.
- [3] Wheeler, O.E., *Spectrum Loading and Crack Growth*, Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 94, pp. 181-186, 1972.
- [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*, J.B. Chang and C.M. Hudson, Eds., ASTM STP 748, pp. 85-102, 1981.
- [5] Newman JC Jr. *A Crack Closure Model for Predicting Fatigue Crack Growth under Aircraft Spectrum Loading*, *Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading*, Chang JB, Hudson CM. (Eds), ASTM STP 748, pp53-84, 1981.
- [6] *Fatigue Crack Growth Computer program "NASGRO" Version 3.0*. Reference Manual, JSC-22267B, Lyndon B. Johnson Space Center. NASA, Texas, 2001.
- [7] Moreno B, Zapatero J, Dominguez J. *An experimental analysis of fatigue crack growth under random loading*. *International Journal of Fatigue*, 25, pp. 597-608, 2003.
- [8] Zapatero J, Moreno B, González-Herrera A, Dominguez, J. *Numerical and experimental analysis of the fatigue crack growth under random loading*. *International Journal of Fatigue*, 27, pp. 878-890, 2005.
- [9] Newman, Jr., J. C. *A crack opening stress equation for fatigue crack growth*, *International Journal of Fracture*, Vol. 24 No. 3, 1984.
- [10] M. Skorupa et al. *Application of the strip-yield model from the NASGRO software to predict fatigue crack growth in aluminium alloys under constant and variable amplitude loading*. *Eng. Fract. Mech.* vol. 74, pp. 291-313, 2007.
- [11] Zapatero J, Moreno B, Dominguez J. *On the use of the strip-yield model to predict fatigue crack growth under irregular loading*. *Fatigue Fract. Engng Mater Struct.*, 20, pp. 759-770, 1997.