

DISTRIBUCION DE LA VIDA A FATIGA EN FUNCION DEL ESPECTRO DE CARGAS Y DE LA LONGITUD
DEL REGISTRO UTILIZADO

J. Dominguez* y J. Zapatero**

* ETSII, Universidad de Sevilla

* EUP, Universidad de Málaga

Resumen. Una fuente de error en la determinación de la vida a fatiga de un elemento es la definición de las cargas que actúan. Estas son generalmente aleatorias. El análisis de la resistencia, mediante simulación o ensayo, se realiza a partir de un registro de cargas representativo de las cargas reales, que se repite indefinidamente hasta el fallo. El resultado obtenido con el registro seleccionado es uno cualquiera de los que pueden obtenerse con los distintos registros representativos del mismo proceso de carga. La vida obtenida con estas historias de carga, incluso considerando constantes el resto de los parámetros que influyen en la vida, es una variable aleatoria. En el estudio del proceso de crecimiento debe considerarse por tanto el carácter aleatorio adicional introducido por la definición una historia de carga determinada como representativa las cargas reales. En este trabajo se estudia la influencia del registro de cargas seleccionado para el análisis de la vida, considerando el efecto del número de ciclos del mismo y la densidad espectral del proceso de carga. Se realizan simulaciones de crecimiento con un modelo de crecimiento, que considera el efecto de secuencia. El análisis se hace con seis densidades espectrales distintas y seis longitudes de la historia de carga para cada una de ellas.

Abstract. One source of error on the determination of fatigue life is the definition of the actuating loads. These are generally random. The analysis of the fatigue life, by simulation or test, is done using a load history of finite length which is repeated indefinitely until failure. This load history is considered representative of the whole random load process. Even if all other parameters are considered constant, the fatigue life obtained with this load history is not the same to that calculated with another load history representing the same random process. It is a random variable. To analyse by test or cycle by cycle simulation, the fatigue life of a system under random loads, the additional randomness produced by the definition of the load history must be considered. In this paper the effect of the selected load history on the life is analysed, considering the number of cycles in that history and the power spectral density of the loading process. It is done by simulating the crack growth with the Johnson model, which consider the sequence effect, and analysing the results obtained with six different power spectral densities and six length of the load history for each power spectral density.

1. INTRODUCCION

Para determinar la vida a fatiga en crecimiento de grieta ante cargas aleatorias, deben emplearse registros de carga que representen lo más fielmente posible las sollicitaciones producidas sobre el sistema objeto de estudio. Básicamente hay dos maneras de obtener los registros de carga: una, directamente del sistema en condiciones de servicio (midiendo cargas o deformaciones); y otra, mediante simulación en ordenador. En cualquier caso es necesario registrar o simular las cargas correspondientes a los distintos regímenes de funcionamiento a que va a estar sometido el sistema y conocer la distribución de cada uno de ellos a lo largo de la vida, para aplicar ciclos de carga correspondientes a estos regímenes en igual proporción a la que aparecen en la realidad. En el caso de obtención mediante simulación, es necesario además conocer los parámetros estadísticos de cada uno de los regímenes a que

está sometido el elemento. De esta forma, los registros obtenidos serán representativos de los reales, producidos en el elemento en servicio.

Dada la complejidad de las variaciones de cargas que pueden producirse en muchos sistemas mecánicos, la diversidad de regímenes posibles y las distintas distribuciones que estos pueden tener en el tiempo, la obtención de un registro representativo se convierte en un problema de difícil solución. Desde hace varios años se está trabajando en la búsqueda de registros standard de ciertos procesos que puedan ser empleados con garantía, para determinados objetivos de análisis de fatiga, como representativos de todo el proceso de carga del sistema de que se trate. La industria de automoción y fundamentalmente la aeronáutica han obtenido registros standard aplicables a distintos órganos estructurales o mecánicos de vehículos o aviones. Ejemplos de estos son: los registros "BRACKET" y "SUSPENSION" de SAE [1]; "TWIST" y "FALSTAFF"

[2,3], para aviones; "HELIX" y "FELIX" [4], para helicópteros; "CARLOS", "TURBISTAN" y "WASH" [5], aplicados en automoción, rotores de turbinas de gas y plataformas marinas, respectivamente; etc. Todos ellos tratan de ser representativos de los esfuerzos a que están sometidos estos sistemas.

El número de ciclos que contienen estos registros son muy variables. Esta longitud debe de ser también función de la vida del elemento que se considera y de la diversidad de tipos y niveles de sollicitaciones a que puede estar sometido. La longitud de las primeras historias Standard eran generalmente bastante pequeñas, motivado algunas veces por limitaciones de ordenador [6]. Esta varía desde los 300 ciclos que tiene el registro "I-N" [7], los 1500 a 4000 de las historias de carga definidas por SAE [1] o los más de 16000 del "FALSTAFF", a los más de dos millones del "HELIX" o el "FELIX" [4]. Como se ve el número de ciclos en los programas más recientes ha ido en aumento. No obstante, la variación de la secuencia en que se apliquen distintas partes de los mismos puede dar resultados distintos [8,9]

El hecho de ser de longitud finita estas historias de carga y la necesidad de representar en lo posible todos los estados que puedan afectar a la vida a fatiga, hacen que la definición de los registros Standard sea una tarea compleja. Es necesario conocer perfectamente las cargas a que va ha estar sometida la estructura en muy distintas condiciones de servicio. La elección correcta de los niveles de tensión más altos, la eliminación de los ciclos más pequeños, la secuencia de las cargas y la longitud correcta del registro, son decisiones difíciles a la hora de formar un registro Standard y que pueden afectar grandemente a la vida de fatiga. Schütz [6,10] hace un resumen muy completo de los problemas que se presentan a la hora de determinar un registro Standard.

Se haya obtenido un registro mediante simulación o medida directa, o mediante un proceso mixto, más complejo, como el empleado para los Standards, lo que se tiene al final es una muestra del proceso aleatorio de carga, de longitud finita, más o menos representativa del mismo. Para determinar la vida a fatiga, dicho registro (bloque) se debe aplicar repetidamente, de forma indefinida, tanto en ensayo como si se hace simulación del crecimiento de la grieta, hasta que se produce el fallo.

El tener una longitud finita de registro, es una fuente de error por dos razones principalmente. Por un lado, al ir repitiendo el bloque hasta el fallo o hasta alcanzar una longitud de grieta determinada, se introduce un efecto de secuencia artificial, tanto mayor cuanto menor sea la longitud del registro. Con esta repetición del bloque de carga, la carga máxima, por ejemplo, es repetida con cada bloque a intervalos iguales de número de ciclos, produciendo unos efectos u otros en función del valor de dicha carga máxima correspondiente al registro concreto empleado.

Por otro lado, como se ha indicado, la historia

de carga que se emplee, y repita hasta el fallo, no será más que una muestra del proceso de carga del sistema. Otro registro distinto, de la misma duración pero igualmente representativo puede dar un resultado diferente. Aún con registros de una gran longitud, el valor de la vida obtenido es un valor cualquiera de los que se se obtendrían con distintos registros del mismo proceso aleatorio. Considerando que pueden mantenerse constantes el resto de los parámetros que influyen sobre la resistencia a fatiga, el valor calculado u obtenido en ensayo con determinada historia de carga, no tiene por que ser la media ni el valor mínimo de los que pueden producirse con el conjunto de registros representativos posibles, pudiendo haber grandes diferencias en la predicción de la resistencia.

La utilización de un registro u otro representativo del proceso de carga introduce una aleatoriedad adicional en la vida a fatiga determinada, ya sea mediante cálculo o en ensayo. Por ello es conveniente determinar la distribución estadística de la vida obtenida, en función de la historia de carga considerada, independientemente del resto de los factores que producen aleatoriedad en la vida a fatiga de cualquier sistema.

En este trabajo, se van a estudiar los efectos de considerar distintas longitudes de registros, y las distribuciones de vida producidas en función del número de ciclos de los registros empleados y de las características estadísticas del proceso de carga. Dicho estudio se hará considerando procesos de carga estacionarios representables mediante su densidad espectral y el valor medio.

2. PROCEDIMIENTO DE ANALISIS

El estudio se hace con seis tipos distintos de carga de variación aleatoria, con distribución de Gauss, denominados Tipo 1 a Tipo 6. Todos de media cero y definidos mediante la densidad espectral de las tensiones nominales producidas (S(w)). En la tabla I se muestran los valores característicos de las densidades espectrales consideradas, estando representado en la figura 1 el significado de estos valores. α es un parámetro representativo de la irregularidad de la carga, indicativo del ancho de banda. Representa el cociente entre la frecuencia media de la variable y la frecuencia media de picos. Su expresión es:

$$\alpha = \frac{M_2}{\sqrt{M_0} M_4} \tag{1}$$

Representando Mn el momento de orden n:

$$Mn = \int_{-\infty}^{\infty} w^n S(w) dw \tag{2}$$

Las seis funciones de densidad espectral se han seleccionado de forma que todos los tipos de carga tengan la misma media cuadrática. Esto es, el mismo momento de orden cero (Mo = 35).

Para cada tipo de carga se han definido seis longitudes distintas (números de picos) de registro. Estas son: 1000, 2000, 5000, 10000,

25000 y 100000 picos. En adelante se empleará indistintamente la palabra ciclos o picos para indicar la mitad del número de inversiones del sentido de la carga.

Tipo	H1	H2	W1	W2	W3	W4	a
1	3.5	-	10	20	-	-	.937
2	1.0	-	5	40	-	-	.7953
3	1.0	0.5	10	20	25	75	.769
4	0.5	0.333	10	20	20	110	.76
5	1.0	0.5	5	15	25	75	.756
6	2.0	0.3	5	15	80	130	.64

TABLA I. Parámetros de las densidades correspondientes a los tipos de cargas consideradas (Fig. 1)

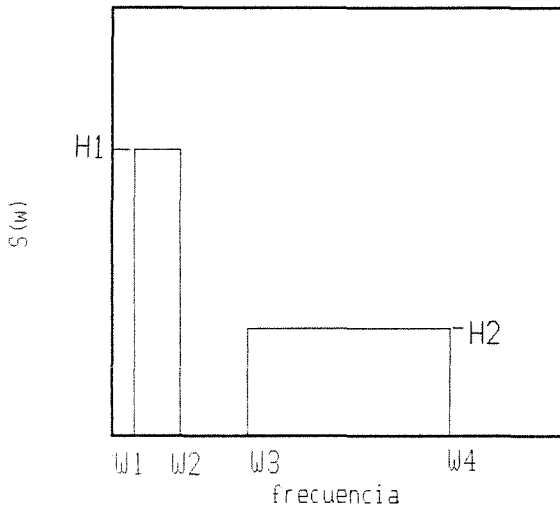


Figura 1. Densidades espectrales de las tensiones nominales.

Por cada tipo de carga y número de picos seleccionado, se han generado mediante simulación más de 100 historias de carga aleatorias, excepto en el caso de registros con 100000 picos, de los que se generan entre 35 y 50 historias de carga distintas, dependiendo del tipo. La simulación se ha realizado mediante superposición de funciones sinusoidales, de frecuencia y fase aleatoria, con distribución uniforme [11].

Con cada uno de los registros de tensiones obtenido, se realiza la simulación del crecimiento de una grieta por fatiga con dos niveles de tensión: uno (B), resultante de multiplicar los registros de tensiones obtenidos mediante simulación con los datos indicados previamente, por 7.2; y otro (A), multiplicando estos registros por 11.2. En adelante se denominará grupo de registros a cada conjunto formado por las historias de carga de la misma longitud y correspondientes al mismo tipo de carga y nivel de tensión.

Como modelo de crecimiento se ha elegido uno que tiene en cuenta los efectos de retardo debido a sobrecargas. Se trata de una modificación del de Willemborg que recoge la posibilidad de aceleración por sobrecargas de compresión (Johnson

[12]). La ecuación de crecimiento empleada con el modelo es la de Forman modificada :

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \Delta K_{ef}^n}{(1 - R_{ef})^m K_c - \Delta K_{ef}} \quad (3)$$

Donde K_c es el factor de intensidad de tensiones crítico y ΔK_{ef} se define como:

$$\Delta K_{ef} = (S_{max\ ef} - S_{min\ ef}) F \sqrt{\pi a} = \Delta S_{ef} F \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

siendo F un factor geométrico. Las definiciones de $S_{max\ ef}$, $S_{min\ ef}$ y R_{ef} son las conocidas del modelo de Willemborg [13]. La aceleración producida por sobrecargas negativas se tiene en cuenta considerando valores negativos de las tensiones residuales en el modelo de Willemborg citado. Se incluye el efecto del umbral de crecimiento haciendo que la grieta no crezca si $\Delta K_{ef} < \Delta K_{th}$, siendo ΔK_{th} el incremento del factor de intensidad de tensiones umbral, por debajo del cual la grieta no se propaga.

El material sobre el que se han realizado las simulaciones es aluminio 2219-T851. Los parámetros para aplicación de la ecuación de Forman en el modelo son [12]:

- $C = 4.626 \cdot 10^{-6}$
- $n = 3.171$
- $K_c = 99 \text{ Mpa m}$
- $\Delta K_{th} = 3.3 \text{ Mpa m}$
- $\sigma_y = 345 \text{ Mpa}$

Considerándose una probeta con geometría tal que el factor geométrico es la unidad ($F=1$), con una longitud inicial de grieta de 0.5 mm y una longitud final de 5 mm.

Para cada grupo de más de 100 registros, se han analizado las vidas obtenidas. Puede comprobarse que se producen diferencias importantes en los valores de vida calculados para dos registros del mismo grupo, y que dichas diferencias dependen de distintos factores, entre los que se encuentran el número de ciclos de la historia de carga, el tipo de densidad espectral y el nivel de tensiones. A continuación se analizan algunos aspectos de los resultados obtenidos.

3. RESULTADOS

Para analizar la influencia del ancho de banda, de la longitud del registro y del nivel de tensiones, en los resultados obtenidos por simulación, se han comparado diversos parámetros estadísticos de las vidas obtenidas con cada grupo de historias de carga. Entre ellos se ha incluido la media, la desviación típica (σ) y el coeficiente de variación COV (σ/media), etc.

Desviación típica y COV

Para un ancho de banda determinado, la desviación típica de la vida obtenida con distintos grupos de registros disminuye fuertemente al aumentar la longitud de los registros del grupo. Se divide, aproximadamente, por cuatro al emplear registros de 100000 ciclos, comparado con el caso de 1000 ciclos. En

la figura 2 se representa la variación de σ con el logaritmo de la longitud del registro para cargas del nivel A de tensión. Como se aprecia en la figura, el comportamiento es similar para todos los anchos de banda analizados.

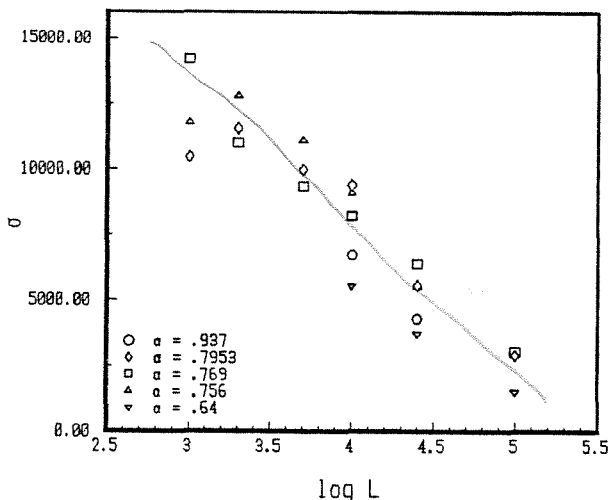


Figura 2. Evolución de σ con la longitud de los registros.

El COV también disminuye con el aumento de la longitud del registro en la misma proporción que σ . Para las mismas longitudes y tipos de carga, el COV es siempre menor para tensiones más bajas.

La influencia del ancho de banda sobre estos parámetros es sin embargo importante. Para una misma longitud de registro, con bandas relativamente estrechas, α entre .934 y .75, el coeficiente de variación aumenta moderadamente al hacerlo el ancho de banda (el COV varía entre .045 y .05 para $L=25000$). Para $\alpha = .64$, sin embargo, se invierte la tendencia disminuyendo fuertemente tanto σ como COV (COV = .02, con 25000 ciclos).

Media

En lo que a la vida media obtenida con cada conjunto de registros se refiere, puede decirse que ésta depende muy poco de la longitud de los mismos.

El ancho de banda sí tiene un efecto importante. Los valores medios de vida obtenidos por simulación a partir de registros del mismo nivel de tensión pero con ancho de banda distinto, disminuyen al aumentar el ancho de banda. Así, por ejemplo, para el nivel de tensión A, las vidas medias obtenidas con registros de 25000 picos son 95629 para $\alpha = .937$ y 178865 para $\alpha = .64$. En el caso del nivel B de tensión, los valores para los α indicados son 395665 y 917640 ciclos, respectivamente.

Si, en vez de considerar el número de picos, también llamado hasta ahora ciclos, se empleara el número de veces que la tensión cruza su valor medio con pendiente positiva, los valores anteriores se convierten en 89604 y 114474, con el nivel de tensión A para α igual a .934 y .64, respectivamente. En el caso del nivel B, estos valores son 370738 y 587290.

Se ha intentado buscar un parámetro que permita determinar la evolución de la vida media con el ancho de banda. Se ha comprobado que para cada nivel de carga, dicho valor medio de la vida está relacionado con el ancho de banda a través del parámetro $\alpha_{1.5}$, definido en general:

$$\alpha_n = \frac{M_n}{\sqrt{M_0 M_{2n}}} \tag{5}$$

Se ha comprobado que para cada nivel de tensión, aproximadamente se cumple:

$$\bar{X}_j \alpha_{1.5j}^2 = D \tag{6}$$

donde D es una constante para cada nivel, \bar{X} es la vida media, y cada subíndice j representa un tipo de espectro de carga.

A partir de esta aproximación, con los resultados obtenidos por simulación con un grupo de registros de cierto ancho de banda, podrá aproximarse la vida media que se obtendría con registros de otro ancho de banda, pero el mismo nivel de carga. Otros autores [14,15] han utilizado factores de corrección similares para determinar la vida a fatiga evitando la simulación. No obstante, los datos de partida en estos casos han sido los resultados de simulación empleando un criterio de daño lineal, sin considerar efecto de secuencia.

En la tabla II se comparan los valores de vida calculados para distintos α empleando la ecuación (6), con los obtenidos por simulación. La constante D para cada nivel de tensiones se ha obtenido ajustando la ecuación a los valores simulados con $\alpha = .769$. Se puede apreciar que las diferencias no superan en ningún caso el 8%. En la figura 3 se muestra la evolución que tendría D, ajustada para cada ancho de banda con el nivel de tensión A. Puede comprobarse que D permanece aproximadamente constante, mientras la vida media varía entre 100000 y 180000.

nivel\alpha	.937	.7953	.789	.76	.756	.64
A Sim.	96118	115910	121009	123178	125336	178865
A Ec.6	87212	114271	--	122785	127088	186134
B Sim.	397797	521196	556237	566917	584185	917640
B Ec.6	410081	525269	--	564406	584184	855601

Tabla II. Comparación de resultados de la ecuación 6 y simulación.

Distribuciones Estadísticas

Los valores de vida estimados con cada uno de los registros de un mismo grupo no son iguales. Siguen una determinada distribución estadística. La obtención de ésta es importante para tener idea de como varían los resultados obtenidos dependiendo de que se emplee uno u otro registro representativo. Ello hará posible acotar la incertidumbre de una sola estimación. En éste trabajo se ha buscado el tipo de función de densidad de probabilidad (fdp) que mejor se ajusta a la muestra obtenida, y se ha determinado la evolución de los parámetros de dicha distribución al aumentar la longitud de los registros. También se ha buscado la variación en función del ancho de banda.

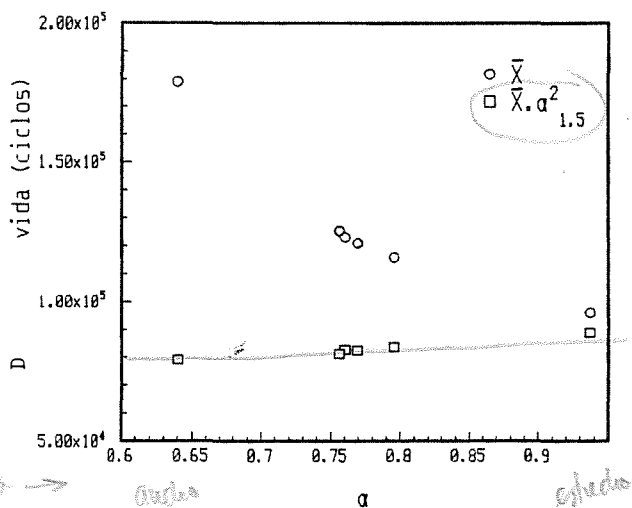


Figura 3. Variación de D con α para el nivel de tensión A.

Las fdp obtenidas con distintos grupos de registros de carga son asimétricas, con una cola hacia los valores crecientes. De acuerdo con ello y con el tipo de proceso que se está tratando, se han intentado ajustar varias distribuciones típicas de valores extremos y la distribución de Rayleigh. Las fdp de extremos utilizadas han sido la de Gumbel, Frechet, y Weibull de tres parámetros, todas ellas para valores máximos. Se realiza el ajuste mediante trazado sobre papel probabilístico.

Cualquiera de ellas, excepto la distribución de Rayleigh, se ajusta razonablemente bien a la muestra, siendo la de Frechet la peor de las tres. En la figura 4 se representa sobre papel probabilístico de Gumbel la distribución de vida para registros de 10000 picos y $\alpha=0.64$. Determinado el error del ajuste, se encuentra ligeramente mejor la de Gumbel. Así mismo, debido a que es una distribución más simple, se toma como distribución representativa del proceso en estudio. En la figura 5 se representa la distribución de los datos mostrados en la figura anterior y la de Gumbel ajustada para esa muestra. Como se ve, la concordancia de datos es muy grande.

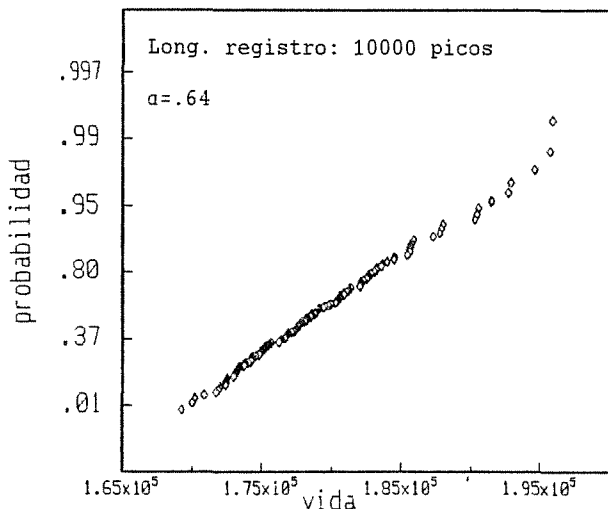


Figura 4. Distribución de vida. Papel de Gumbel.

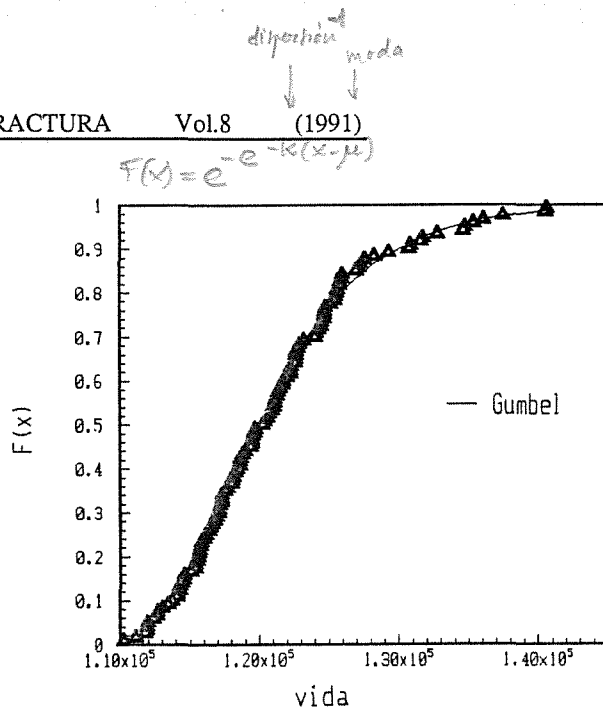


Figura 5. Distribución de vida. $N=10000$, $\alpha=0.64$.

La función de distribución de Gumbel, cuya expresión es:

$$F_x(x) = \exp[-\exp(-k(x-u))] \quad (7)$$

depende de dos parámetros "k" y "u". Siendo "u" la moda y "k" una medida de la dispersión. Para analizar la influencia de la longitud de los registros y del ancho de banda sobre la distribución, se ha estudiado la variación de estos parámetros para distintas longitudes de registro de un mismo proceso, y para distintos anchos de banda.

Se ha comprobado que para un proceso de carga determinado, "u" crece a medida que lo hace la longitud de la historia. Su variación con el ancho de banda del proceso de carga es muy similar a la de \bar{X} indicada previamente, pudiéndose aproximar por la misma ecuación (6).

En relación a "k", para un mismo tipo y nivel de carga, este parámetro crece mucho más acusadamente que "u" al hacerlo la longitud del registro. Teniendo en cuenta que "k" es una medida de la dispersión de la variable, ello indica que esta se hace mucho más estrecha al aumentar la longitud.

En la figura 6 se representa sobre papel probabilístico, las distribuciones de vida para distintas longitudes de registro de un proceso de carga del tipo 6. Se puede observar claramente la variación de las pendientes de la distribución a medida que aumenta la longitud de los registros.

Este comportamiento se presenta para todos los niveles de tensión y tipos de carga. En la figura 7 se representa la variación de "k" con la longitud de los registros, para cinco anchos de banda. De acuerdo con esto, simulaciones realizadas a partir de registros cortos pueden producir resultados muy alejados de los valores que se producirían con un registro continuo, más representativo de la realidad, ya que en él que no aparecen repeticiones cíclicas de las cargas. Además, dos historias del mismo grupo pueden producir estimaciones de vida muy dispares.

Disparidad que disminuirá al incrementar la longitud de los registros empleados en la simulación.

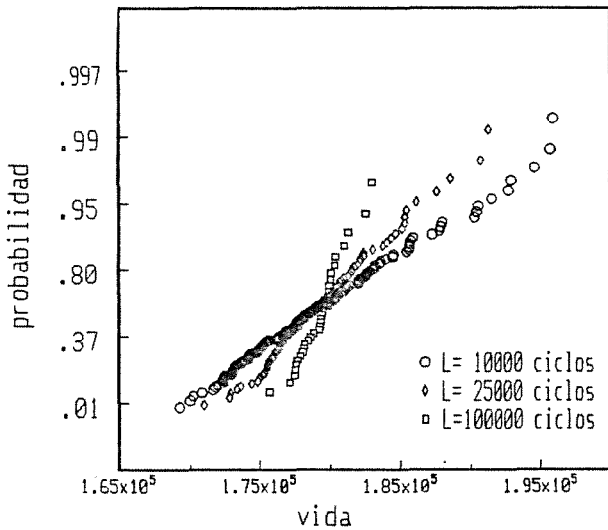


Figura 6. Distribuciones de vida para varias longitudes de registros (L).

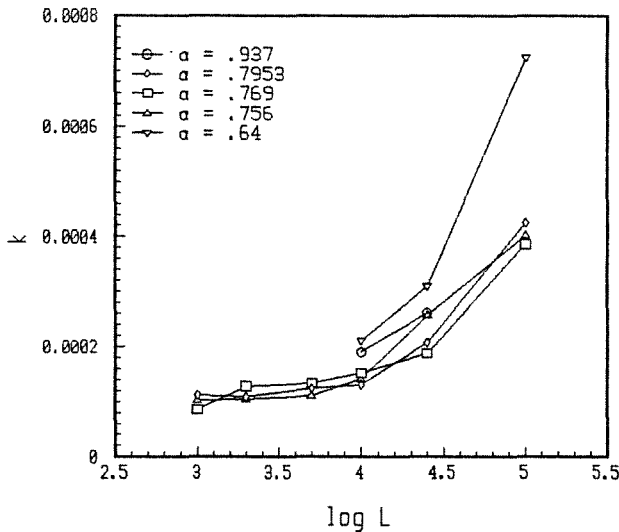


Figura 7. Variación de "k" con la longitud de los registros.

Correlación valor extremo-vida

Como se ha indicado, al emplear registros de longitud finita, y repetirlos indefinidamente hasta el fallo, se está introduciendo un efecto de secuencia artificial. Los valores más altos de los picos de la historia de carga pueden considerarse sobrecargas que se repiten periódicamente. Por ello, los valores de estos pocos picos más altos y especialmente el valor extremo de cada historia, podrían tener una influencia importante en la vida determinada. Los resultados obtenidos para cada uno de los registros de idéntica longitud, densidad espectral y nivel de tensiones pueden depender de alguna forma de estos valores.

Para ver la influencia del valor extremo de cada

registro en la vida simulada, se han obtenido para cada grupo de registros, correlaciones entre los valores de vida simulados con cada registro y el valor extremo de los mismos. En la Tabla III se muestran los valores del coeficiente de correlación entre ambas variables, obtenido con cinco de los seis tipos de carga.

En las distintas filas se muestran los valores correspondientes a cada tipo de carga y nivel de tensión. Cada columna corresponde a una longitud de los registros, representada por el número de picos.

Puede comprobarse que la correlación no sigue una tendencia clara en función de la longitud de la historia de carga, si bien es algo mayor para registros de 1000 ciclos que para el resto. Esto último puede ser debido a que al ser muy cortas las historias, el falso efecto de secuencia producido es más acusado. Sin embargo, los resultados muestran una clara dependencia de la correlación con el ancho de la densidad espectral. Puede decirse que el valor extremo de un registro tiene mayor influencia sobre los resultados obtenidos en simulación para historias

Tipo	N° Cicl	1000	2000	5000	10000	25000	100000
1	A	---	---	---	.75	---	---
	B	---	---	---	.76	---	---
2	A	.5	.58	.38	.48	.5	.27
	B	.3	.51	.21	.44	.53	.35
3	A	.48	.33	.37	.37	.42	.34
	B	.31	.24	.35	.38	.41	.35
5	A	.43	.33	.47	.38	.31	.045
	B	.20	.28	.44	.38	.31	.093
6	A	---	---	---	-.07	-.10	.007
	B	---	---	---	-.07	-.12	-.027

TABLA III. Coeficiente de correlación (ρ) entre valores extremos de los registros (x) y vida obtenida (y) ($\rho = \mu_{xy} / \sigma_x \sigma_y$).

de carga de banda estrecha. Así, se comprueba que los valores más altos del coeficiente de correlación se obtienen con las cargas tipo 1, cuya banda de frecuencias es la más estrecha ($\alpha = 0.937$). Los coeficientes más bajos se producen con las cargas de banda más ancha, que son las tipo 6 ($\alpha = 0.64$).

En las Figuras 8 y 9 se muestran las vidas obtenidas frente a los valores máximos de las historias, para los registros tipo 1 y 6, respectivamente. En ambos casos, las historias son del nivel B de tensiones y 25000 ciclos. Se aprecia una correlación bastante fuerte en el caso de banda estrecha, y prácticamente nula con carga tipo 6. En la figura 10 se muestran los resultados de la columna de 25000 ciclos de la tabla, en función del parámetro de ancho de banda (α), para los dos niveles de tensión.

Estos resultados concuerdan bastante bien con los obtenidos por Veers et al. [16] en simulaciones realizadas con registros del tipo A-A de ASTM [7]. Sin embargo, hay que notar que los registros utilizados por Veers tienen solo 1300 ciclos, son de banda estrecha ($\alpha = .812$) y tienen un nivel alto de tensión. Todo ello tendente a

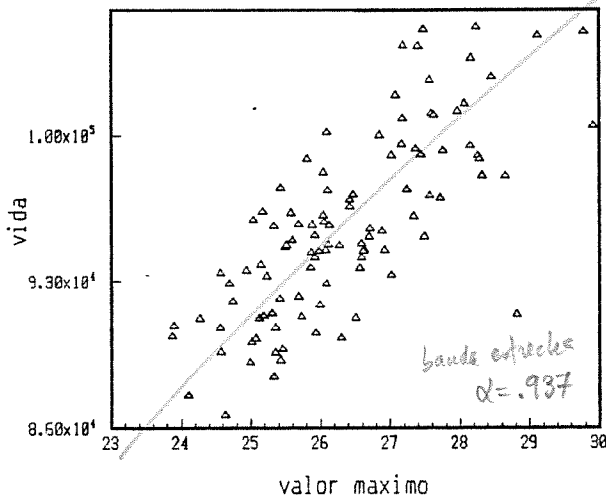


Figura 8. Relación vida-valores extremos de los registros. 25000 ciclos; carga tipo 1.

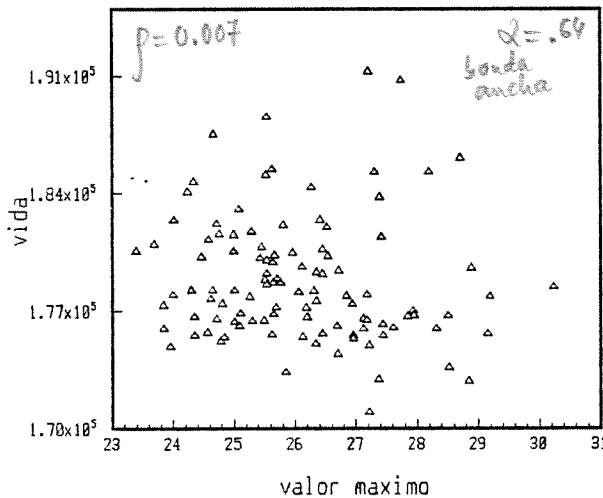


Figura 9. Relación vida-valores extremos de los registros. 25000 ciclos; carga tipo 6.

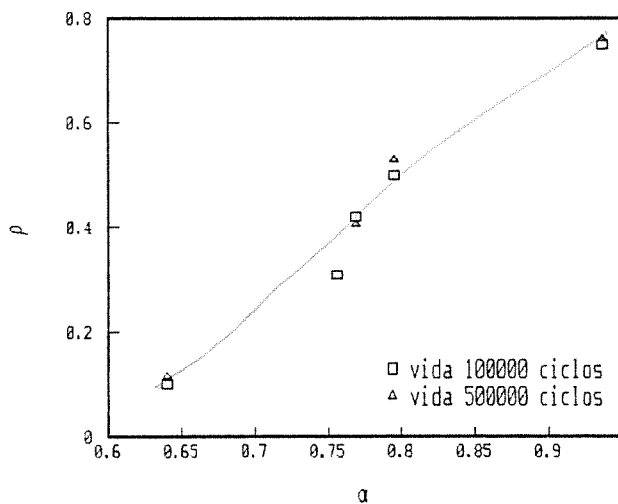


Figura 10. Coeficiente de correlación en función del ancho de banda (a).

producir correlaciones más altas. Estos autores no presentan ningún dato sobre simulaciones realizadas con registros de banda ancha, por lo que no pueden extenderse sus resultados de correlaciones a estos tipos de carga.

4. CONCLUSIONES

De todo lo anterior se puede concluir que a la hora de hacer la simulación o el ensayo de un proceso de crecimiento de grieta bajo cargas aleatorias, será importante la decisión sobre la longitud del registro a emplear.

El uso de un registro no suficientemente largo, repetido hasta el fallo puede dar origen a resultados no conservativos, produciendo vidas mucho mayores que las obtenidas con historias de carga más largas y que las presumiblemente obtenidas en la realidad.

Dicho efecto se presenta con cualquier tipo de espectro, por lo que este factor deberá tenerse en cuenta tanto para casos de procesos de carga de banda ancha como para banda estrecha.

5. REFERENCIAS

- [1] Tucker L., Bussa S., "The SAE Cumulative Fatigue Damage Test Program" R.M. Wetzel (Ed), Fatigue Under Complex Loading: Analysis and Experiments, 1977, pp 1-53.
- [2] De Jonge J.B., Schutz D., Lovak H., Schijve J., "A Standardized Load Sequence for Flight Simulation Tests on Transport Aircraft Wing Structures", NLR TR 73029 U, 1973.
- [3] Van Dijk G.M., De Jonge J.B., "Introduction to a Fighter Aircraft Loading standard for Fatigue Evaluation "FALSTAFF" (Part I)", NLR MP 75017 U, 1975
- [4] Ten Have, A.A., "HELIX and FELIX: Loading Standards for Use in Fatigue Evaluation of Helicopter Rotor Components", NLR MP 82041 U, 1982.
- [5] Ten Have, A.A., "European Approaches in Standard Spectrum Development", Development of Fatigue Loading Spectra, J.M. Potter y R.T. Watanabe (Eds.), ASTM STP 1006, 1989, pp. 17-35.
- [6] Schütz, W. y Heuler, P., "The How and Why of Variable Amplitude Testing", Fatigue 87, R.O. Ritchie y E.A. Starke, Jr. (Eds.), EMAS, 1987, pp. 479-494.
- [7] Chang J.B. "Round-robin Crack Growth Prediction on Center Cracked Tension Specime Under Random Spectrum Loading", Chang J.B. and Hudson C.M. (Eds), Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth Under random Loading, ASTM STP 748, 1981, pp 3-40.
- [8] Abelkis P.R., "Effect of Transport aircraft Wing Loads Spectrum Variation on Crack Growth" ASTM STP 714, 1980, pp 143-169.

- [9] Hewitt R.L. "Some Effects of Load Spectrum Representation on Crack Growth Predictions and Problems in Prediction Validation", Int. Journal Fatigue, 1987, pp 15-162.
- [10] Schütz, W., "Standardized Stress-Time Histories-An Overview", Development of Fatigue Loading Spectra, J.M. Potter y R.T. Watanabe (Eds.), ASTM STP 1006, 1989, pp. 3-16.
- [11] Shinozuka M., "Applications of Digital Simulation of Gaussian Random Processes", Random Excitation of Structures by Earthquakes and Atmospheric Turbulence, Parkus H. (Ed), Springer Verlag, 1977.
- [12] Johnson W.S., "Multi-Parameter Yield Zone Model for Predicting Spectrum Crack Growth", NASA Tech. Mem. 81890, 1980.
- [13] Engle R.M., Rudd J.L., "Analysis of Crack Propagation Under Variable Amplitude Loading Using The Willemborg Retardation Model", AIAA paper, 1974, 74-369.
- [14] Lutes L.D. et al " Stochastics Fatigue Damage Accumulation", Jour. of Struc. Engineering, Vol. 110 N: 11, 1984, pp 2585-2601.
- [15] Wirsching P.H., Light M.C., "Fatigue Under Wide Band Random Stresses", Journal and Structural Division, ASCE, paper 15574, Vol. 106, N: ST7, 1980, pp 1593-1607.
- [16] Veers P.S. et al, "Variable Amplitude Load Models for Fatigue Damage Crack Growth", ASTM STP 1006, 1989, pp 172-197.