

## ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE ACUMULACIÓN DE DAÑO DE FATIGA

I. Aramburu y A. M. Irisarri

FUNDACION INASMET. Mikeletegi Pasealekua 2, 20009 San Sebastián

**Resumen:** Se han analizado distintos modelos propuestos para predecir la vida a fatiga de los componentes que se hallan en servicio sometidos a sollicitaciones de amplitud variable, en base a los resultados obtenidos en los ensayos efectuados en el laboratorio, aplicando ciclos de amplitud constante. Entre los distintos modelos propuestos el más simple es la ley de acumulación de daño lineal de Palmgren y Miner. Sin embargo, este modelo presenta el serio inconveniente de que, al no tener en cuenta el efecto ejercido por el orden de aplicación de los ciclos puede conducir a errores importantes en la valoración de la vida en servicio de un equipo. En un intento de superar estas limitaciones se han desarrollado otros métodos, que si tienen en cuenta el efecto ejercido por la secuencia de aplicación de los ciclos sobre el daño acumulado. Estos métodos se analizan brevemente en el presente trabajo, comentando las mejoras que estos métodos introducen con respecto a la tradicional ley de Palmgren y Miner, pero también los errores que se pueden cometer caso de una aplicación poco cuidadosa de los mismos.

**Abstract:** Different models which have been proposed to predict the life of a component that is operating under variable amplitude fatigue using the results obtained in tests performed under constant amplitude have been analysed. The simplest model is the linear cumulative damage law proposed by Palmgren and Miner. However, this model does not consider the influence of the cycle sequence on the life and can lead to significant errors. In order to overcome this risk other models that include the effect of this sequence on the accumulated damage have been developed. These methods are briefly analysed, and the improvements in the predictions but also some possible errors are commented.

## 1. INTRODUCCIÓN

La forma habitual de caracterizar el comportamiento a fatiga de un material consiste en la realización de unos ensayos de fatiga, aplicando una tensión que, si bien varía periódicamente a lo largo del ciclo, tanto su valor medio como su amplitud se mantienen constantes a lo largo de todo el ensayo. Sin embargo, las sollicitaciones que soportan las estructuras en servicio, generalmente, tienen un carácter aleatorio, variando la amplitud y la tensión media de un ciclo a otro. Es evidente que la posibilidad de utilizar datos obtenidos en los ensayos de amplitud constante para predecir la vida a fatiga de un componente posee un gran atractivo dada la relativa sencillez de la metodología de ensayo frente a la gran dificultad que supone el reproducir la secuencia de ciclos de servicio, tanto más cuando ésta puede no ser repetitiva.

El daño de fatiga se puede definir como la disminución en las prestaciones que sufre un material como consecuencia de la aplicación de los sucesivos ciclos. La validez de los métodos de predicción de vida se basa en el supuesto de que la acumulación del daño se produce de forma similar en los dos casos; fatiga de amplitud constante y de amplitud variable. De esta forma se puede admitir que el daño provocado por la aplicación de los sucesivos ciclos de fatiga sobre el material de la probeta de laboratorio o sobre el del componente real ejerce un mismo efecto negativo. El problema radica en la falta de una ley fiable de acumulación de daño, requisito imprescindible para valorar la merma que induce cada ciclo. Si bien se han

propuesto distintos modelos para intentar alcanzar este objetivo ninguno de ellos ha logrado una aceptación universal, y los datos publicados a favor de uno u otro modelo parecen contradictorios.

El objetivo del presente trabajo es efectuar una revisión crítica de los distintos modelos propuestos, centrándose especialmente en aquellos que parecen más prometedores, y se comprueba el ajuste de algunos datos publicados en la bibliografía a las predicciones de vida bajo sollicitaciones de amplitud variable que se obtienen por cada uno de ellos.

## 2. EL FENÓMENO DE LA FATIGA

ASTM define la fatiga como el proceso de cambio estructural, progresivo, localizado y permanente que se produce en un material sometido a unas condiciones que suponen la aplicación de unas tensiones o unas deformaciones fluctuantes en algún punto, o puntos, del mismo y que pueden culminar en la formación de grietas o en la fractura total tras un número suficiente de ciclos.

Esta definición incluye una serie de términos que merecen ser comentados puesto que tienen gran trascendencia a la hora de estudiar la acumulación de daño por fatiga. En primer lugar, la palabra "progresivo" implica que el daño se va incrementando a lo largo del periodo de permanencia en servicio del componente. En segundo, "permanente" indica que el daño provocado en el material por los ciclos de fatiga no puede eliminarse por la simple retirada de las

cargas. Este punto es muy importante en el estudio de la acumulación de daño ya que el provocado en unas condiciones determinadas es el punto de partida para sumar el que se produce en la aplicación de los sucesivos ciclos.

En resumen, se puede asociar el daño de fatiga con los cambios en el material que se producen como consecuencia de la aplicación de cargas cíclicas, que, a su vez, se traducen en cambios de la geometría de la grieta, un endurecimiento por deformación cíclica y la generación de tensiones residuales. Por tanto, la acumulación del daño supone la suma acumulada de los provocados por cada ciclo, en cuanto a cada uno de estos factores se refiere. Si estos se hallaran unívocamente relacionados entre sí la fatiga podría ser descrita por un único parámetro, por ejemplo la longitud de la grieta, independientemente de la magnitud de la tensión. Desgraciadamente, esta única correlación no existe en la realidad. El caso es aún mucho más complejo cuando se considera la fatiga de amplitud variable. Es sobradamente conocido el efecto que ejerce un pico de sobrecarga en la propagación de una grieta que progresa bajo ciclos de menor amplitud, retrasando su crecimiento. Las tensión residual de compresión generada en el extremo de la grieta tras la aplicación de la sobrecarga provoca una mayor dificultad para la progresión de la grieta que no recobra su ritmo anterior hasta después de haber abandonado esta zona plástica. El endurecimiento por deformación contribuye también a este retardo.

Esta observación de una situación muy simple puede extenderse a otras en las que se aplican de forma consecutiva ciclos de diferente amplitud. Se observa que el crecimiento de grieta que se produce en un ciclo determinado depende del daño que presente el material como consecuencia de la aplicación de los anteriores. Esta influencia de los ciclos anteriores sobre el daño provocado por uno concreto se denominó en los primeros trabajos publicados con el nombre de "efecto de interacción", al suponer que existía este efecto entre los daños provocados por los sucesivos ciclos de diferente magnitud. Aunque hoy en día se admite que la influencia de los ciclos previos sobre el daño provocado por uno concreto y la de éste sobre los sucesivos, no se produce realmente por una interacción se mantiene este término para diferenciar la acumulación de daño que se produce bajo ciclos de amplitud variable de la que se genera en condiciones de amplitud constante.

La forma más habitual de valorar el daño es mediante la suma de los cocientes entre el número de ciclos de cada tipo que se han aplicado y el número de estos que provocarían la rotura en condiciones de fatiga de amplitud constante. Cuando esta suma resulta mayor que 1 existe un efecto de interacción favorable. Si el valor es menor que 1, la interacción ejerce un efecto perjudicial sobre la vida a fatiga. En realidad este método proporciona la mayor información cuando la forma de los ciclos varía sólo una vez en el ensayo. Si

se produce más de un cambio y la suma resulta mayor que 1, se puede interpretar como la indicación de un efecto positivo de interacción pero resulta imposible discernir si esta influencia positiva se debe a la aplicación de los ciclos de mayor amplitud sobre la posterior acumulación de daño durante la aplicación de los ciclos de menor amplitud o a la inversa.

### 3. MODELOS DE ACUMULACIÓN DE DAÑO DE FATIGA

Seguidamente se analizan estos modelos centrándose fundamentalmente en aquellos que parecen ofrecer una mayor precisión en sus predicciones o han alcanzado un mayor grado de utilización. Una exposición más detallada de los modelos que se han ido proponiendo a lo largo de los años se puede encontrar en los trabajos publicados por Schjive [1] o por Hwang y Han [2]. Más recientemente Chaboche y Gallerneau han efectuado una revisión de las técnicas de predicción de vida de componentes que operan a elevada temperatura, incluyendo el efecto ejercido por la prolongada permanencia en estas condiciones [3], aspecto éste que no se contempla en el presente análisis.

#### 3.1 Modelos de acumulación lineal del daño.

El modelo más utilizado en la predicción del daño acumulado es el propuesto por Palmgren [4] y Miner, [5] a pesar de que, como se demostrará posteriormente, sus predicciones pueden llegar a ser altamente erróneas. Su popularidad se debe en gran medida a la sencillez de cálculo. El modelo fue desarrollado por Palmgren en 1924 y se basa en dos supuestos. El primero supone que la aplicación de  $n_i$  ciclos consume una fracción de vida que es igual al cociente  $n_i / N_i$ , donde  $N_i$  es el número de ciclos a rotura en un ensayo de amplitud constante, efectuado en las mismas condiciones de tensión media y amplitud de tensión. El segundo, considera que el fallo del componente se producirá cuando la suma de todas estas fracciones de vida alcance la unidad.

Con posterioridad a esta primera formulación de la teoría de acumulación de daño, diversos autores realizaron otras prácticamente coincidentes. Entre ellas la más conocida es la de Miner, publicada a mediados de los años cuarenta, hasta el punto de que el modelo se conoce habitualmente con el nombre de Ley de Palmgren y Miner, o simplemente como Ley de Miner. Sin embargo, entre los trabajos de Palmgren y Miner, Langer [6] presentó otro en el que además de llegar a una ecuación similar, dividía la vida a fatiga en dos etapas; nucleación y propagación de la grieta. Según dicha formulación no sólo la suma de las fracciones de vida total debía resultar igual a la unidad, sino que lo mismo debía suceder en cada una de las dos etapas. El problema se halla en definir el momento en que finaliza el primer periodo y se inicia el segundo. En algunos trabajos posteriores se ha insistido sobre este punto pero la incertidumbre aún persiste. Pese a su

contribución el nombre de Langer rara vez se cita al referirse a esta ley.

El espectro irregular de ciclos reales se descompone en otros mucho más simples, que pueden ser analizados con relativa facilidad, por algún método, entre los cuales el que mayor popularidad ha alcanzado es el conocido como "conteo de la caída del agua de lluvia", en muchas ocasiones designado por su nombre en inglés de rainflow counting. El nombre se debe a la similitud existente entre el método empleado para la extracción de los ciclos individuales de fatiga y la caída de la lluvia a lo largo del tejado de una pagoda. Una vez extraídos los ciclos que se utilizaran en el análisis, el siguiente paso consiste, en muchas ocasiones, en valorar el efecto ejercido por la tensión media de cada ciclo sobre la vida a fatiga ya que difícilmente aquella será cero en todos ellos. Esta transformación se suele efectuar empleando para ello las relaciones entre los valores de la amplitud de tensión y la tensión media propuestas por Goodman, Soderberg o Gerber.

Desde el mismo momento de la publicación del artículo de Miner han surgido numerosas acerca de la validez de la ley de daño acumulado que propone. Así, tan sólo un año después de su presentación se presentaron los resultados obtenidos en ensayos de fatiga efectuados sobre probetas en que se habían aplicado previamente una serie de ciclos [7] en que se apreciaba una notable influencia de estos ciclos previos sobre la vida a fatiga. Se observó que las gráficas correspondientes a las diferentes condiciones convergían a un único punto correspondiente a una vida de fatiga de tan sólo 20.000 ciclos. Basándose en estos y otros resultados, Manson y sus colaboradores propusieron un modelo de acumulación de daño realizando una rotación de la curva S-N para la predicción de la vida a fatiga [8]. Dado que un posterior análisis crítico de este método, apoyado tanto en un mayor volumen de datos como en consideraciones de tipo teórico puso de manifiesto los puntos débiles del mismo (9), no se entrará a discutirlo.

Ya se ha señalado, y luego se comentará más ampliamente, que al no tener en cuenta el efecto ejercido por la secuencia de aplicación de los ciclos, el método puede conducir a predicciones erróneas. La facilidad de aplicación representa su mayor atractivo pero ante este riesgo de cometer errores en la predicción de la vida a fatiga de componentes parece oportuno introducir alguna modificación que permita alcanzar una mayor precisión. En este sentido se han propuesto diferentes métodos que tienen en común el no cuestionar la acumulación lineal de daño, aunque intentan introducir el efecto ejercido sobre la vida a fatiga por la secuencia de aplicación de las cargas de diversas formas. En las revisiones que se han efectuado de los modelos propuestos [1,2] se recogen las distintas variantes de la ley lineal que se han ido presentando y las diferentes formas en que abordan la problemática de la secuencia de ciclos. Sin entrar en detalles conviene recalcar que se ha establecido un valor de la

suma de las fracciones de vida distinto de la unidad, que el efecto del daño de fatiga se considere como el provocado por una entalla que se hubiera introducido en el material o que, dado que los ciclos de mayor amplitud generan unas tensiones residuales en el fondo de la grieta, afectando a su posterior progresión bajo los ciclos menores, el número de ciclos a rotura a utilizar en el cálculo no sea el obtenido en ensayos de amplitud constante sino en los efectuados sobre probetas a las que se ha aplicado una precarga de un nivel igual a la tensión máxima de la secuencia real de ciclos, de forma que induzca una tensión residual similar.

La ley de Palmgren y Miner se basa en datos obtenidos en ensayos de fatiga de amplitud constante. Sin embargo, existe la posibilidad de adoptar otros que se hayan obtenido en ensayos de amplitud variable. Para poder utilizar este método es necesario definir previamente un espectro de ciclos y efectuar los ensayos de fatiga de acuerdo con el mismo. De esta forma es posible obtener unas curvas que relacionen la tensión representativa de este espectro frente al número de ciclos a rotura. El siguiente paso es descomponer un espectro real, arbitrario, en una suma de estos espectros definidos y proceder de una forma similar a la seguida para la utilización de la ley de Palmgren y Miner.

El método no cuestiona por tanto la suma lineal de daño sino que propone el uso de los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga de amplitud variable, en lugar de los tradicionales de amplitud constante. El mayor problema de este método se halla en la uniformidad de las secuencias de ciclos a utilizar, ya que éstas no están normalizadas y varían según el tipo de componente que se esté estudiando. Otro punto que puede conducir a una apreciable diferencia en las predicciones es el relativo a cual debe ser el valor representativo de la tensión que se debe representar en las gráficas de la tensión frente al número de ciclos a rotura. Este valor condiciona la posterior descomposición del espectro real en unos más simples. El valor más utilizado es la media geométrica de la tensión de cada ciclo [1].

### 3.2 La Curva de Daño.

Es evidente que cualquier modelo que proponga una acumulación no lineal del daño conducirá a una ley que venga expresada por una curva en lugar de por la recta característica de una acumulación lineal. De hecho algunos de los modelos anteriormente comentados ya proponen una ley de este tipo. La idea de una curva de daño no es nueva puesto que data del año 1948, esto es, poco después de la presentación del trabajo de Miner sobre acumulación lineal del daño. Los primeros en formular esta idea fueron Richart y Newmark [10] si bien no presentaron ninguna ley que pudiera representarla de forma cuantitativa.

Desde entonces se han realizado múltiples intentos de representar el daño por medio de una ley de tipo no

lineal. En su revisión de los diversos modelos de daño, Hwang y Han [2] analizan las distintas variantes, clasificándolas en tres grupos; aquellas que proponen que la variación del daño con el número de ciclos es monotónica creciente, aquellas otras que proponen leyes monotónicas decrecientes y aquellas que consideran que esta variación es constante. Este último grupo supone que la acumulación del daño es lineal e incluye, por tanto, la ley de Palmgren y Miner.

De todas las formulaciones de la curva de daño, muy probablemente, la que mayor aceptación ha recibido ha sido la realizada por Manson y Halford [11] en 1981, que es la que se analiza a continuación. El concepto de la curva de daño establece que la acumulación de éste se produce siguiendo la curva asociada con el nivel de vida (o de tensión aplicada) correspondiente. Esto supone que si el primer bloque de ciclos de amplitud constante incrementa el daño desde cero hasta el nivel correspondiente al punto A, cualquier daño que se produzca en otras condiciones de tensión deberá partir desde este mismo nivel (punto B) y seguir la curva de daño obtenida para la nueva tensión. De esta forma, la aplicación de los sucesivos incrementará el daño hasta alcanzar el correspondiente al nivel del punto C. Si se varía de nuevo el nivel de tensión de los ciclos de fatiga, el proceso prosigue de una forma similar hasta el momento en que se produce la rotura (nivel de daño 1).

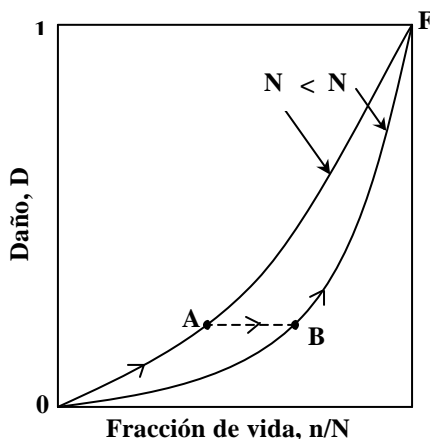


Fig. 1. Curvas de daño correspondientes a dos niveles de tensión aplicada.

La figura 1 muestra de forma esquemática el proceso de acumulación del daño de fatiga. En esta figura se muestra claramente el efecto ejercido por el orden de aplicación de los ciclos. Si el primer bloque de ciclos se aplica a un nivel de tensión elevado, el daño progresa desde el punto de origen hasta el A. En ese punto se reduce el nivel de la tensión, por lo que el proceso de daño pasa a proseguir siguiendo la nueva curva, partiendo del mismo nivel de daño (punto B) hasta la rotura. Es evidente la suma de las relaciones entre el número de ciclos aplicados y aquellos que conducen a la rotura en fatiga de amplitud constante, omite el tramo AB y será, por tanto, inferior a la unidad. En el caso de que la aplicación de los ciclos se

produzca en el orden inverso, este tramo AB se incluirá dos veces, por lo que la suma total de las fracciones de vida será mayor que 1. Posteriormente, se discuten algunas limitaciones que presenta el uso de esta curva de daño en la predicción de la vida a fatiga bajo condiciones de amplitud variable.

De acuerdo con la formulación efectuada por Manson y Halford la curva de acumulación de dos niveles de daño viene dada por la ecuación:

$$D = [1 / 0.18] \cdot [a_0 + (0.18 - a_0) \cdot (n / N)^{(2/3)} \cdot (N)^{0.4}] \quad (1)$$

donde  $a_0$  representa el tamaño característico de los defectos al comienzo de la aplicación del daño, que para simplificar algunos cálculos se puede asumir sin gran error que es igual a cero. Sin entrar a detallar el método seguido para la deducción de esta ecuación, que se pueden encontrar en la citada publicación, si se debe señalar que se basa en algunos resultados previos obtenidos por los propios autores desde el año 1965, algunos de ellos con una difusión previa restringida, y posee, por tanto, un carácter empírico.

En un posterior análisis, realizado por los mismos autores [9], se señalaron algunos aspectos que merecen ser comentados. En primer lugar, igualando los niveles de daño idénticos, pero que han sido provocados por ciclos de fatiga con dos amplitudes de tensión diferentes, las constantes  $a_0$ , 0.18 y  $2/3$  que aparecen en la expresión del daño se eliminan. Esto supone que la relación entre las fracciones de vida que provocan daños equivalentes ( $n_1 / N_1$  y  $n_2 / N_2$ ) únicamente depende de la relación existente entre las vidas bajo condiciones de fatiga de amplitud constante y no de los valores de dichas constantes. Esta observación coincide con la que formularon al proponer la ecuación de daño, ya que indicaron que la sustitución del exponente 0.4 de la ecuación por valores comprendidos entre 0.3 y 0.5 no alteraba de forma apreciable el resultado. Esta falta de efecto de las constantes permite atribuirles unos valores que permitan convertir la curva de daño correspondiente a una cierta vida (o nivel de tensión) en una línea recta y adaptar la forma de las restantes en función de ella.

Otro punto que ha sido destacado es el hecho de que la forma de las curvas de daño conduce a una caída de las fracciones de vida  $n_2 / N_2$  para valores bajos de la fracción  $n_1 / N_1$  extremadamente rápida. Esto, y la comprobación de la dificultad que existe para mejorar las predicciones en este rango de vida, pero manteniendo al mismo tiempo la buena precisión que muestran cuando la fracción de vida inicial es mayor, condujo a estos mismos autores a la formulación de la curva doble de daño, que se comenta posteriormente.

La aplicación por parte de Manson y Halford [11] de la curva de daño propuesta a la predicción de vida a fatiga de amplitud variable de materiales tan diferentes como un acero maraging 300 CVM, un acero de baja

aleación AISI 4130, una aleación Ti-6Al-4V o una aleación de aluminio, conduce a unos resultados altamente satisfactorios, hallándose en la gran mayoría de los casos muy próximos los valores previstos y los resultados experimentales. En algunos casos la predicción cae del lado optimista lo que puede conducir a la aparición de fallos inesperados. No obstante, se debe recalcar que las diferencias existentes entre las predicciones y los valores reales son generalmente pequeñas y tan sólo en una ocasión llega a rebasar la relación de 1.5. En un trabajo efectuado por otros autores acerca de la acumulación de daño de fatiga de una aleación base níquel MAR-M 247 en aire o en hidrógeno con alta presión (12), también se llega a una conclusión similar puesto que se considera que el empleo de la curva de daño conduce a unas predicciones de la vida a fatiga razonablemente acertadas en ambas situaciones.

Un aspecto que no aparece recogido entre las imprecisiones del modelo de la curva de daño es el efecto creado sobre la vida a fatiga por la aplicación de una o más sobrecargas de mayor amplitud, seguidas por un nuevo bloque de ciclos de las mismas condiciones que los iniciales. La aplicación inicial de los ciclos de pequeña amplitud provoca un cierto daño hasta alcanzar un determinado nivel. En ese momento, la aplicación de una sobrecarga, o de un cierto número de ellas incrementa este daño a lo largo de la curva de daño correspondiente a la mayor tensión. Cuando se vuelve a aplicar un nuevo bloque de ciclos de fatiga de pequeña amplitud el daño del material se incrementa hasta alcanzar el instante en que se produce la rotura. La simple observación de la figura pone de manifiesto que la suma de las fracciones de vida a los distintos niveles de tensión debe ser superior a la unidad. Esta predicción se halla de acuerdo con los resultados que se han obtenido en diversos materiales metálicos en que se ha comprobado que se obtenía una mayor vida tras la aplicación de un reducido número de sobrecargas.

Sin embargo, en estos trabajos y de forma más notoria en uno recientemente publicado en que se analiza el comportamiento de un acero inoxidable 316L, se ha observado que esta tendencia se cumple cuando el número de sobrecargas aplicado es limitado o el nivel de dichas sobrecargas relativamente bajo pero la tendencia se invierte cuando dicho número rebasa una cierta cantidad. En ese momento la aplicación de nuevas sobrecargas no sólo no retarda el fallo sino que lo acelera (13). Esta posibilidad de inversión de la tendencia no aparece debidamente reflejada en la curva de daño ya que la fracción de vida consumida por la aplicación de las sobrecargas es siempre mayor que la correspondiente al mismo incremento de daño bajo unas condiciones de amplitud constante. Esto supone que la curva de daño predice adecuadamente el efecto positivo ejercido por la aplicación de unas pocas sobrecargas pero no la situación contraria que se presenta cuando el número de sobrecargas rebasa un cierto límite.

### 3.3 La Curva Doble de Daño.

Ya se ha comentado que una de las limitaciones que presenta la curva de daño se halla en la fuerte caída de la fracción de vida  $n_2 / N_2$  que prevé cuando se incrementa muy ligeramente el valor de la fracción  $n_1 / N_1$ , en el rango de esta última que se halla próximo a cero. En un intento de superar esta deficiencia del método de valoración del daño acumulado Manson y Halford [11] propusieron el uso de un nuevo método basado en la denominada curva doble de daño. Esta formulación propone el empleo de una ley de daño que viene dada por una expresión que incluye dos sumandos; el primero proporcional a la fracción de vida y el segundo a una potencia de dicha fracción, de la forma.

$$D = q_1 \cdot (n / N) + (1 - q_1) \cdot (n / N)^{q_2} \quad (2)$$

donde las constantes  $q_1$  y  $q_2$  son a su vez función de la relación existente entre las vidas en la condición en que se ha aplicado el daño y aquella otra que se toma como condición de referencia y que corresponde a aquella en la cual la curva de daño se ha convertido a una forma lineal. Esta ecuación mejora la pendiente de la curva de daño en las proximidades del origen, especialmente en aquellas condiciones en que la relación entre la vida a fatiga de los ciclos analizados y la de referencia es elevada. Sin embargo, se señala que sería necesaria una mejora aún mayor para valores pequeños de esta relación. Para ello basándose en datos experimentales se ha propuesto introducir algunas modificaciones en esta ecuación [9].

### 3.4 La Ley de Doble Daño Lineal.

La posibilidad de valorar la acumulación de daño por medio de una ley doble lineal aparece ya incluida en el artículo pionero de Langer [6]. La idea se basa en dividir el daño total en dos fases, cada una de las cuales satisface una relación lineal de daño. Esto supone que la representación del daño acumulado frente a la fracción de vida viene expresada por dos tramos rectos, de distinta pendiente, que corresponden a cada una de estas dos etapas. Si bien en un principio se propuso que estas etapas debían coincidir con las fases de nucleación y de propagación de las grietas, posteriormente se abandonó la hipótesis, e incluso se puso en duda su validez, al no ser capaces de detectar ninguna grieta al final de la primera etapa que, teóricamente correspondía a la nucleación de las mismas. Por este motivo, se optó por pasar a designar las dos etapas del agrietamiento simplemente como fases I y II, sin entrar a considerar si la grieta se hallaba o no ya presente al final de la primera de ellas [9].

En su publicación en la que proponen un método para la implementación práctica de la curva de daño y de esta ley de doble daño lineal, estableciendo un procedimiento para fijar el punto en que se produce este cambio de fase en el proceso de agrietamiento, Manson y Halford [11] señalan que la comparación

entre los valores experimentales y las predicciones efectuadas utilizando esta ley doble lineal resulta altamente satisfactoria. Una de las principales conclusiones que se alcanzan en este trabajo es la referente a la falta de criticidad de la decisión acerca del momento en que se supone que se produce la transición de la primera a la segunda fase. Esta observación tiene gran importancia ya que facilita la labor, al permitir fijar las coordenadas del punto donde se produce la inflexión en función de la relación existente entre las vidas correspondientes a los dos bloques de ciclos de fatiga, en lugar de utilizar(2) únicamente el primero de ellos (aquel que de acuerdo con la primera formulación debía coincidir con el final de la fase de iniciación del agrietamiento), proponiendo utilizar para este fin las ecuaciones:

$$(n_1 / N_1)_k = 0.35 \cdot (N_1 / N_2)^\alpha \quad (3)$$

$$(n_2 / N_2)_k = 0.65 \cdot (N_1 / N_2)^\alpha \quad (4)$$

donde  $(n_1 / N_1)_k$  y  $(n_2 / N_2)_k$  representan las coordenadas del citado punto de inflexión y  $\alpha$  es una constante que se considera en una primera aproximación igual a 0.25.

En principio el método se desarrolló para el caso en que primero se aplicara un bloque de ciclos en unas condiciones determinadas y, a continuación, el otro hasta el momento en que se produce la rotura. Sin embargo, en la revisión del método efectuada por Manson y Halford [9] se señala la posibilidad de que el método se extienda al caso de múltiples cambios entre estos dos niveles, es decir, que se aplique un cierto número de ciclos del nivel 1, seguido de otro de ciclos de nivel 2, para volver al primitivo nivel, donde se aplica un número igual al del principio, y el proceso continúa hasta el instante en que se produce la rotura. En este caso, es posible determinar cuantas secuencias ciclos de nivel 1 – ciclos de nivel 2 – ciclos de nivel 1, será capaz de soportar el material antes de que se produzca el fallo.

El método se ha aplicado al análisis de algunos datos de la NASA [14] para valorar su capacidad de predecir adecuadamente la vida a fatiga en condiciones de amplitud variable. Se ha comprobado un buen grado de precisión, incluso mejor que el obtenido con la curva de daño, y, desde luego, notablemente más preciso que el obtenido por medio de la ley de daño lineal de Palmgren y Miner, la cual conduce a un error apreciable. Se debe recalcar, no obstante, que el mejor ajuste se logra modificando el valor de la constante  $\alpha$ , que se incrementa hasta 0.35 desde el tradicional valor de 0.25 [9].

Por el contrario, se ha señalado una limitación de la capacidad de este método para predecir la vida a fatiga de los materiales ha sido señalada en un trabajo publicado por Zhang y Miller [15] en el cual se analizaba el comportamiento a fatiga un acero al

carbono sometido a sucesivos ciclos de fatiga bajo esfuerzos de tracción – compresión y de torsión. Según estos autores el método falla a la hora de intentar predecir la vida a fatiga de componentes sometidos que se hallan sometidos a un estado de tensiones complejo.

#### 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Schijve J. The Accumulation of Fatigue Damage in Aircraft Materials and Structures. AGARD-AG-157, 1972.
- [2] Hwang W. y Han K. S. Cumulative Damage Models and Multi-Stress Fatigue Life Prediction. Journal of Composite Materials, Vol. 20, 1986, 125 – 153.
- [3] Chaboche J. L. y Gallerneau F. An Overview of the Damage Approach of Durability Modelling at Elevated Temperature. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol. 24, 2001, 405 – 418.
- [4] Palmgren A. Die Lebensdauer von Kugellager. Z.V.D.I. Vol. 68, 1924, 339-341
- [5] Miner M. A. Cumulative Damage in Fatigue. J. Appl. Mech. Vol. 12, 1945, A159 – A164.
- [6] Langer B. F. Fatigue Failure from Stress Cycles of Varying Amplitude. J. Appl. Mech. Vol. 14 1937, A160 – A162.
- [7] Bennett J. A. A Study of the Damaging Effect of Fatigue Stressing on X4130 Steel. Proc. ASTM Vol. 46, 1946, 693 – 714.
- [8] Manson S. S., Nachtigall A. J. y Freche J. C. A Proposed New Relation for Cumulative Fatigue Damage in Bending. Proc. ASTM Vol. 61, 1961, 679 – 692.
- [9] Manson S. S. y Halford G. R. Re-examination of Cumulative Fatigue Damage Analysis – An Engineering Perspective. Engng. Frac. Mech. Vol. 25, Nº 5/6, 1986, 539 – 571.
- [10] Richart F. E. y Newmark N. M. An Hypothesis for Determination of Cumulative Damage in Fatigue. Proc. ASTM, 48, 1948, 767 – 800.
- [11] Manson S. S. y Halford G. R. Practical Implementation of the Double Linear Damage Rule and Damage Curve Approach for Treating Cumulative Damage. Int. J. Fracture, Vol. 17, 1981, 169 – 192.
- [12] Mc. Gaw M. A., Sreeramesh K., Moore D. y Heine J. The Cumulative Fatigue Damage Behavior of MAR-M 247 in Air and High Pressure Hydrogen. Advances in Fatigue Lifetime Predictive Twchniques. Second Volume, ASTM STP 1211, 1993, 117-131.
- [13] Wheatley G., Estrin Y., Hu X. Z. y Brechet Y. Interaction between Low Cycle Fatigue and High Cycle Fatigue in 316 L Stainless Steel. Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behaviour of Materials. Elsevier Science, 1998, 567 – 572.
- [14] Manson S. S. y Halford G. R. Complexities of High Temperature Metal Fatigue: Some Steps Toward Understanding. Israel Journal of Technology, Vol. 21, 1983, 29 – 53.
- [15] Zhang W. y Miller K. J. A Study of Cumulative Damage under Variable Loading-Mode Conditions. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol. 19, Nº 2/3, 1996, 229 – 239