Capítulo 1

Introducción

La problemática de los fallos por fatiga afecta a un gran número de componentes en los más diversos campos de aplicación. Desde maquinaria pesada para distintos tipos de industria, instrumentos deportivos, medios de transporte, hasta componentes a escala micrométrica.

Al ser un proceso de crecimiento de grieta paulatino que culmina con la fractura de la pieza, prácticamente no se alteran las dimensiones de la misma, hecho que complica considerablemente su detección. Esto produce que la gran mayoría de los fallos ocurran de manera inesperada y conlleven, en muchos casos, un gran riesgo para personas.

Se tiene conocimiento de esta problemática desde la segunda etapa de la revolución industrial (mediados del siglo XIX), con la aparición de los trenes de manera masiva y los estudios de Wöhler. Este investigador alemán fue el responsable de la introducción del término “fatiga” para fallos que se producían bajo ciertas condiciones de carga cíclica, como así también del concepto de “límite de fatiga” para referirse a una tensión por debajo de la cual una pieza no fallará sin importar el número de ciclos de carga y descarga a los que se la someta [1, 2]. En sus trabajos, Wöhler relacionaba directamente la tensión cíclica sobre una pieza con el número de ciclos necesarios para provocar su fallo, dando lugar a la bien conocida curva S-N, de la cual derivaron muchos métodos de cálculo de resistencia a fatiga [3].

Estos últimos, denominados métodos clásicos de cálculo a fatiga, sólo permiten al diseñador hacer una estimación cruda del tiempo que una grieta, sometida a una carga monoaxial, tarda en crecer desde longitud cero hasta una cierta longitud a partir de la cual su crecimiento puede ser descrito mediante la Mecánica de Fractura. Puesto que en ellos el propio comportamiento

de la microgrieta se obvia totalmente, su aplicación constituye casi un arte, apoyado en un recetario de diversos coeficientes experimentales: de acabado superficial, de tamaño, de concentración de tensiones, etc. La asignación de estos coeficientes (especialmente los de acabado superficial y sensibilidad a la entalla) es en gran medida arbitraria, lo que implica una gran dispersión en los resultados.

Por otro lado, prácticamente todos los componentes de máquina presentan estados de tensión y deformación multiaxial cíclica en su funcionamiento. La generalización del concepto de límite de fatiga a condiciones multiaxiales de tensión, normalmente se realiza mediante la separación del espacio de tensiones en dos regiones. Una de dichas regiones contiene las combinaciones de tensiones “seguras”, en el sentido de que se supone que se puede aplicar un alto número de ciclos (teóricamente infinitos ciclos) de esas combinaciones de tensiones sin que se produzca el fallo del componente. La región segura contiene el origen de tensiones y su contorno es una superficie cerrada. En general puede decirse que cada criterio propuesto de fatiga multiaxial lo que hace es especificar la forma o ecuación de esa superficie basándose en diferentes argumentos o incluso en el espacio concreto de tensiones en que se formulará el criterio (por ejemplo en tensiones desviadoras).

En una reciente revisión Papadopoulos et al. [4] clasifican los criterios más usados en tres categorías: aproximaciones basadas en los invariantes del tensor de tensiones, aproximaciones basadas en el concepto del plano crítico y aproximaciones basadas en promedios de los indicadores de tensión en un volumen elemental de material (incluyendo aquí la llamada aproximación mesoscópica).

Los criterios basados en los invariantes del tensor de tensiones son los primeros en aparecer históricamente, como una mera aplicación a fatiga de los bien conocidos criterios de plastificación de metales. En particular el criterio de von Mises, basado en el segundo invariante del tensor desviador, está en el origen de casi todos los criterios de este tipo. Es indudable la existencia de similitudes entre el proceso de fatiga y el proceso inicial de plastificación en el límite elástico. En particular, los modelos de apilamiento de dislocaciones que se utilizan para explicar la dependencia tipo Hall-Petch del límite de fatiga y del límite elástico con la inversa de la raíz cuadrada del tamaño de grano, son similares desde el punto de vista matemático. Por otro lado hay, lógicamente, diferencias. Una diferencia potencialmente muy importante entre un criterio de plastificación y un criterio de fatiga es el papel que juega

en uno u otro caso la tensión hidrostática. Es bien sabido que, al menos para tensiones hidrostáticas moderadas, éstas no intervienen en el proceso de plastificación de metales. Sin embargo, en fatiga una tensión hidrostática de compresión perpendicular a la incipiente grieta puede provocar que ésta se encuentre cerrada, al menos parcialmente, y reducir drásticamente su velocidad de crecimiento. Por el contrario, una tensión hidrostática de tracción puede acelerar enormemente la velocidad de propagación y reducir significativamente la vida. Resulta claro, por tanto, que de alguna forma los criterios de plastificación clásicos deben ser modificados para intentar tener en cuenta las tensiones hidrostáticas.

Los parámetros usados en los criterios basados en la idea de un plano crítico son la tensión normal y las tensiones cortantes en un cierto plano en el que se supone que se desarrollará la grieta crítica de fatiga. Las diferencias entre los diversos criterios propuestos se refieren a qué plano crítico considera cada autor y a qué combinación de fuerzas normales y tangenciales a dicho plano se toma para definir la condición límite de fatiga.

El tercero y más reciente grupo de criterios multiaxiales de fatiga está basado en lo que sus autores denominan la aproximación mesoscópica [5, 6]. De acuerdo con estos autores y utilizando su terminología, el comportamiento a fatiga de metales puede explorarse a diferentes escalas. Por un lado estaría la escala de medio continuo o escala macroscópica, que es la utilizada en los criterios definidos en los dos grupos descritos anteriormente. En el otro extremo se encontraría la escala que ellos denominan microscópica y que es la escala de las dislocaciones. Entre los niveles macro- y micro- existe una región intermedia que es la escala de los granos de un agregado metálico: la denominada escala mesoscópica que representa lo que otra mucha gente llama escala microestructural. Las ideas originarias de estos métodos se pueden buscar en los procedimientos de promediado introducidos por Taylor para relacionar las tensiones aplicadas a una probeta con las tensiones cortantes que aparecen en los sistemas de deslizamiento en los metales policristalinos. Se trata de encontrar una relación entre las tensiones y deformaciones al nivel macroscópico y al nivel microscópico. Estas últimas son las que gobiernan la vida a fatiga y el criterio de fatiga multiaxial se escribe inicialmente como una relación (generalmente lineal) entre las tensiones normales y tangenciales microscópicas. Una vez que se ha obtenido la relación entre las tensiones a los niveles macro- y micro-, sustituyendo en el criterio microscópico se obtiene un criterio multiaxial en función de los tensores de tensiones y deformaciones

usuales (macroscópicos).

Por otro lado, es muy importante considerar que la mayor parte de los fallos por fatiga en componentes de máquinas y estructuras tienen lugar en concentradores de tensiones, los cuales son en general inevitables por la propia naturaleza de su función. De modo que cualquier método para predicción de fallo por fatiga debe tener en cuenta el efecto de los mismos. Existen muchas formas propuestas para abordar el problema, comenzando por los trabajos pioneros de Neuber [7] y Peterson [8] hasta los recientes métodos de distancia crítica propuestos por Taylor [9].

Todas estas técnicas emplean correlaciones entre el valor de la tensión o la deformación en la zona de la entalla, y el número de ciclos que el componente puede resistir, análogamente a la curva S-N introducida por Wöhler [3]. Se trata de modelos fenomenológicos que no modelan directamente la grieta, cuyo crecimiento es el responsable del fallo. Este proceder se justifica solamente con el razonamiento de que mientras la grieta sea pequeña, su presencia no alterará significativamente los campos de tensiones y deformaciones en la mayor parte del sólido y, por tanto, estos parámetros deben caracterizar globalmente el proceso de daño por fatiga.

Como ha podido observarse, ninguno de los criterios multiaxiales normalmente usados en la práctica, ni aquellos más conocidos para componentes entallados, se basa cuantitativamente en el hecho de que el proceso inicial de fatiga está asociado con el crecimiento de microgrietas. Sin embargo, desde principios de la década de los 80 del siglo pasado, se han venido desarrollando teorías de crecimiento de las denominadas grietas pequeñas, que de alguna manera, tratan de extender la mecánica de fractura hasta ese régimen en que las grietas son del tamaño de la propia microestructura del material.

El presente trabajo se enmarca en este ámbito, aplicando el modelo de Navarro y De los Ríos [10, 11], para componentes con concentradores de tensiones sometidos a estados de carga biaxiales. El citado modelo considera a la grieta desde un tamaño comparable con la microestructura del material, lo que le da bases físicas para cuantificar tanto la influencia de la presencia de concentradores de tensiones como de estados de carga biaxiales.

En los capítulos posteriores, se desarrollará una breve descripción teórica del modelo utilizado, tanto para el caso uniaxial, como la extensión al cálculo biaxial. Posteriormente se evaluarán distintos métodos de resolución numérica de las ecuaciones involucradas en el modelo, se elegirá el más adecuado y se obtendrán predicciones que luego se compararán con resultados experimen-

tales. En los capítulos finales se abordará el tema experimental, iniciándose con un análisis numérico, mediante la técnica de elementos finitos, de la geometría de los especímenes a ensayar y de la similitud del campo tensional de ésta con el de una placa infinita. Seguidamente, se muestran y analizan los resultados experimentales de ensayos a torsión y tracción pura, comparándolos con la predicción del modelo de Navarro y De los Ríos para cargas biaxiales proporcionales. Finalmente, se analizan las conclusiones derivadas de los ensayos y se plantea un nuevo horizonte para trabajos futuros.