

Capítulo 1

Introducción

A mediados del siglo XIX, se observaron fallos comunes a determinados componentes estructurales. En concreto, en algunos puentes y vías ferroviarias que se encontraban sometidos a cargas variables, se apreciaba un comportamiento peculiar. La aceptación de que el problema provenía de la variabilidad de las cargas fue casi inmediata, ya que el mismo componente sometido a cargas estáticas de la misma magnitud no presentaba dicho comportamiento; por tanto, el fallo en estos sistemas debía ser consecuencia del ciclo natural de las cargas¹. El problema se definió como “Fatiga de los metales”, y fue considerado como un mecanismo de fractura causado por la variabilidad y periodicidad de las cargas.

Hoy sabemos que la fatiga en los metales es un proceso que causa el fallo prematuro o un daño importante a los componentes de un sistema mecánico sujetos a cargas cíclicas y oscilantes. Se trata de un complejo proceso metalúrgico que es difícil de describir y modelar de forma precisa a nivel microscópico. A pesar de esta complejidad, el análisis del daño a fatiga debía llevarse a cabo para el buen diseño de estos componentes². Consecuentemente, se desarrollaron diferentes métodos de análisis a fatiga; en el presente trabajo se presentan algunos de ellos.

1.1 Fatiga por fretting

Continuando con lo anterior, el fallo de un elemento metálico que se encuentre sometido a la acción de una carga (variable y repetida) que nunca alcanza un nivel suficiente para causar el fallo en su aplicación simple (estática), se conoce también como fatiga de los metales³.

En función de las circunstancias particulares y el entorno de cada componente, al término “fatiga” se le pueden ir incorporando calificativos adicionales que especifican

¹ Adaptación de la introducción de la obra de Wanhill [1].

² Interpretación de la obra de Bannantine [2] dedicada al análisis de proceso de fatiga en los metales.

³ Definición que proporcionó *The Metal Society* en 1983

dicho entorno. En concreto, la fatiga por fretting ocurre cuando coinciden algunas circunstancias adicionales: cuerpos en contacto (con una presión que garantice la existencia de dicha unión), además de otras cargas oscilantes que provoquen deslizamiento relativo de toda o parte de la superficie de unión.

En lo referente a este trabajo, la fatiga se considera un fenómeno por el que en un componente metálico sometido a cargas que sufren variación con el tiempo, pueden aparecer grietas que con la continuada aplicación de éstas u otras cargas pueden crecer hasta alcanzar tamaños que provoquen el fallo del componente o incluso su rotura completa⁴.

1.2 La historia de la Mecánica de la Fractura

Fue en la primera mitad del siglo XIX cuando comienzan a realizarse investigaciones sobre las consecuencias de la fatiga, debido en gran medida a las situaciones comentadas anteriormente que conllevaban el fallo de los sistemas mecánicos de la época⁵. La Revolución Industrial propulsó enormemente el uso de materiales metálicos (principalmente hierro y acero) para la fabricación de componentes de sistemas mecánicos. Desafortunadamente, también tuvieron lugar muchos accidentes por el fallo prematuro de estos componentes.

Algunos de estos fallos estuvieron provocados por un pobre diseño, pero gradualmente se fue comprobando que el problema provenía de deficiencias del material, en forma de defectos que podía provocar el inicio de grietas o incluso la fractura del componente. El desarrollo de nuevas técnicas de fabricación de estos componentes redujo el número de fallos a niveles más aceptables.

Con ello se dio paso a una nueva era de fallos en los sistemas mecánicos de la época. La Segunda Guerra Mundial propició el desarrollo de la Ingeniería de los Procesos de Fabricación y de esta forma la fabricación de barcos y tanques para la guerra. Junto con gran parte de éstos, muchos puentes y componentes de redes ferroviarias también fallaron. El fallo de estos sistemas se producía a bajos niveles de tensiones, en circunstancias que ni por asomo se parecían a las consideradas en diseño; como ocurría con los barcos en los diques. Se observaban roturas frágiles en materiales a priori dúctiles. Investigaciones posteriores concluyeron que estas anomalías se debían tanto al cambio de comportamiento del material con la temperatura como a la presencia de defectos que provocaban concentraciones de tensión en determinadas zonas del material propiciando dicha fractura.

⁴ Definición que se realiza en [6] y que se toma como punto de partida del presente Proyecto.

⁵ La fatiga se convierte en el fallo mecánico más popularmente conocido como consecuencia de titulares de periódicos e informativos acerca de accidentes de aviones, colapsos de los puentes, etc...

El fallo de un sistema mecánico podía estudiarse desde un punto de vista elástico o plástico; estando en el primero de los casos basado en el Teoría de la Elasticidad. Sin embargo, para el estudio de un problema en dominio plástico, debemos acudir a la Mecánica de la Fractura (MF), desarrollada con posterioridad a la primera. El objetivo de la MF era –y es– proporcionar respuestas cuantitativas referentes a la creación y desarrollo de grietas en estos sistemas mecánicos. En concreto, sobre el crecimiento de grietas por fatiga, la MF debía responder a cuestiones como cuánto son las tensiones residuales en función del tamaño de la grieta; cuál es el máximo tamaño de grieta admisible en el componente mecánico; a partir de qué tamaño la grieta comienza a crecer (por ejemplo, a partir del tamaño mínimo detectable); cuánto es la vida en servicio del componente (a partir de un tamaño de defecto característico); y, cómo deben inspeccionarse los componentes durante su vida en servicio para detectar las posibles grietas.

El primer análisis satisfactorio en dominio plástico⁶ fue realizado por Griffith en 1920, estudiando la propagación de grietas en materiales frágiles; afirmó que “la propagación de una grieta existente tendrá lugar si la energía del sistema disminuye con ello”. Por tanto, se reduce el problema a un balance energético, en el que la energía de deformación elástica liberada al propagarse la grieta debe ser mayor que la energía de deformación liberada al iniciarse otra grieta en el material. A pesar de que con esta teoría se consiguió estimar las deformaciones en materiales frágiles y relacionar deformaciones en la fractura y tamaño de grieta, fue modificada en la década de 1940 por Irwin; el cual, afirmó que el balance energético debía de llevarse a cabo entre: la energía de deformación elástica almacenada en el material frente a la energía superficial y el trabajo de deformación plástica. Definió el término de energía liberada por unidad, G , como la energía que se libera durante la creación de una grieta por unidad de incremento del tamaño de grieta. Sin embargo, para el caso de materiales dúctiles, la energía requerida para la formación de nuevas grietas es mucho menor que el trabajo de deformación plástica.

A mediados de la década de 1950, Irwin volvió a contribuir al avance de la MF definiendo el *Factor de Intensidad de Tensiones* (FIT), K , mediante el que puede expresarse toda distribución de tensiones locales alrededor del borde de grieta de la forma:

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f_{ij}(\theta) + \dots \quad (1.1)$$

Donde (r, θ) representan las coordenadas polares respecto del borde de grieta, y σ_{ij} la componente del tensor de tensiones (i,j) .

Según esta teoría, la fractura tiene lugar cuando se alcanza un valor crítico de la distribución de tensiones alrededor del borde de grieta. A ese nivel de tensiones se llega con

⁶ Afirmación recogida en la referencia [1].

un determinado valor del FIT, K_C , o en términos energético⁷, G_C . No obstante, en algunas situaciones –como es el caso de la fatiga– el crecimiento de grietas se produce a niveles inferiores del FIT; lo que se conoce como crecimiento subcrítico.

Posteriores desarrollos de teorías que van más allá que la LEFM (*Lineal Elastic Fracture Mechanics*, Mecánica de la Fractura Lineal y Elástica), han llevado al desarrollo de la llamada Mecánica de la Fractura Elasto–Plástica⁸, cuyos primeros resultados llegaron a partir de 1960. En el presente trabajo no se tendrán en cuenta consideraciones referentes a esta teoría, sino que se abordarán los problemas desde el punto de vista de la teoría elástica, LEFM.

1.3 Predicción de vida a fatiga

La predicción de vida es un procedimiento que trata de estimar por medios analíticos y experimentales cuánto resistirán determinados componentes hasta que el daño acumulado sea tal que no pueda realizarse la función para la que fue diseñado el componente.

En el apartado anterior, se realizó una definición muy teórica del FIT –aunque no menos cierta por ello: el FIT describe la magnitud del campo de tensiones en el borde de la grieta. Pero también puede ser usado para describir el crecimiento de grietas y el comportamiento a fractura de materiales en los que las tensiones cercanas al borde de grieta sean predominantemente elásticas.

En un componente mecánico, sometido a una tensión remota (para diferenciar de la tensión local provocada por un concentrador o por una grieta p.e.) que varía de forma cíclica entre dos valores extremos (un máximo y un mínimo) se pueden definir los siguientes parámetros:

- Tensiones máximas y mínimas: σ_{MAX} y σ_{MIN} ; (1.2)

- Rango de tensiones: $\Delta\sigma = \sigma_{MAX} - \sigma_{MIN}$; (1.3)

- Rango del FIT: $\Delta K = K_{MAX} - K_{MIN}$; (1.4)

- Coeficiente del ciclo de tensiones: $R = \sigma_{MIN}/\sigma_{MAX}$; (1.5)

⁷ La equivalencia entre K y G , es una de las bases de la Mecánica de la Fractura Lineal y Elástica (LEFM – *Lineal Elastic Fracture Mechanics*–). Se debe a que la forma de la distribución de tensiones alrededor del borde de grieta tiene siempre la misma forma.

⁸ Elastic-Plastic Fracture Mechanics –EPFM. Para más información acerca de esta teoría, se remite al lector a la referencia[1] en la que podrá encontrar un estudio mucho más detallado del aquí presentado.

Adicionalmente, se puede definir una velocidad de crecimiento de grieta como el incremento de tamaño de grieta, Δa , en un pequeño número de ciclos, Δn . Su relación, puede escribirse en el límite como una derivada. La dependencia de esta relación con el coeficiente del ciclo de tensiones, R , y con el FIT, ΔK , ha sido demostrada experimentalmente, y por tanto:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) \Rightarrow N_f = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{f(\Delta K, R)} \quad (1.6)$$

1.4 Las cargas y el ciclo de carga

Como se ha comentado, uno de los aspectos diferenciales de la fatiga es la aparición en procesos en los que las cargas varían con el tiempo. Esta variación puede ser debida a multitud de factores y circunstancias; por ejemplo, en el caso de puentes y redes ferroviarias se debe a la propia funcionalidad de la estructura, sometida a cargas que son por naturaleza, oscilantes. En otras situaciones, la variabilidad obedece a factores no identificables tan fácilmente.

De hecho, un escollo importante a salvar a la hora de diseñar cualquier sistema mecánico es adoptar unas cargas de diseño, admitiendo la variabilidad de las mismas y supliendo la falta de información con coeficientes que mayoricen ésta e incluso minoren la resistencia del componente. Por tanto, es un hecho reconocido que los sistemas mecánicos deben enfrentarse ante situaciones en cierto modo desconocidas ante las que deben responder de una forma adecuada; esto es, manteniendo su comportamiento a pesar de las circunstancias.

Por tanto, la determinación del ciclo de carga es una parte de considerable valor en la fase de diseño de componentes. Determinar los valores extremos y la evolución a lo largo de cada período constituye un paso fundamental para el diseño aceptable.

A esto hay que añadir que en el caso de la fatiga por fretting, el contacto entre los cuerpos hace que las tensiones originadas en dicha zona, provoquen un incremento de las tensiones debidas a las cargas actuantes sobre ambos. Como consecuencia de este hecho puede obtenerse una vida del componente mucho menor que en un caso sin contacto.

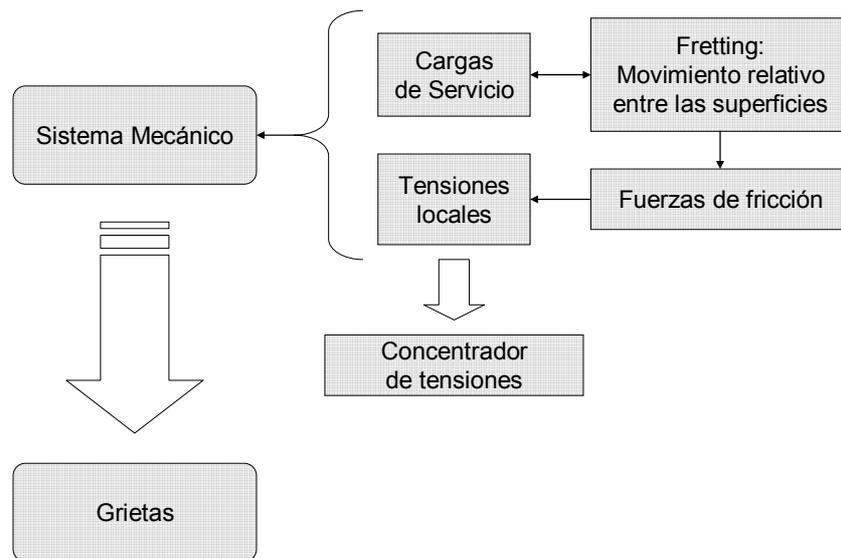


Diagrama 1.1: Influencia del ciclo de carga en la predicción de vida de un sistema mecánico.

De hecho, bajo condiciones de fretting, un sistema mecánico se ve sometido a unas tensiones que pueden entenderse, en algunos casos, como si de una concentrador de tensiones se tratase como consecuencia de lo cual, la generación de grietas en la superficie de contacto es inminente. Este hecho se muestra esquemáticamente en el diagrama 1.1: las cargas de servicios que actúan sobre un sistema mecánico sometido a fretting provocan el deslizamiento relativo entre los cuerpos, lo cual a su vez implica la generación de fuerzas de fricción y el consiguiente incremento de las tensiones locales en la zona de la unión, este incremento puede estudiarse en algunas situaciones como si derivara de un concentrador de tensiones⁹, provocando la generación de grietas en la zona. La forma en la que las tensiones se concentran en la zona de la unión se muestra en el Capítulo 3 de este trabajo.

El alcance del presente Proyecto se restringe al caso de ciclos de carga simétricos, con tensión media nula, como los que se muestran en la figura 1.1. No obstante, teniendo en cuenta la dependencia que existe en el crecimiento de grietas con la forma del ciclo de carga, se pondrán los medios para que, en futuros trabajos, se puedan obtener tales resultados sin apenas modificaciones¹⁰.

⁹ Un desarrollo particular sobre este asunto puede encontrarse en la referencia [6], donde se dedica todo un apartado a este tipo de estudio.

¹⁰ Para más información acerca de la forma en que se evalúa el ciclo de carga en la aplicación asociada a este Proyecto, se remite al lector a los restantes documentos que componen el proyecto: Manual de Usuario y Manual de Programador.

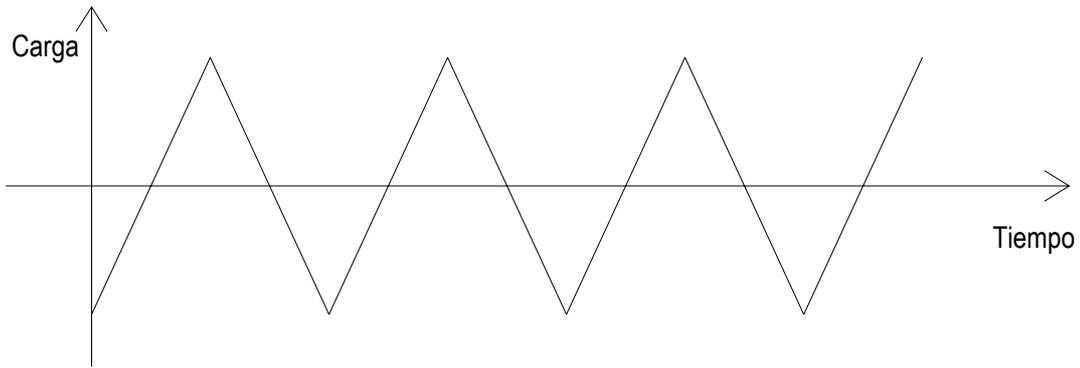


Figura 1.1: Ciclo de carga simétrico.

1.5 Una aplicación en C++.NET

El objetivo de este trabajo es implementar una herramienta informática que permita evaluar de forma fácil y rápida los resultados de un modelo aplicados sobre datos de ensayos de fatiga por fretting. En este sentido, sirve de apoyo a la comprobación teórico-experimental de los resultados obtenidos en dichos ensayos de laboratorio. Para tal fin, se desarrolla una aplicación que permita desempeñar, entre otras, las siguientes funciones:

- Evaluar de las tensiones en un contacto esférico y zonas de alrededor.
- Predecir la vida de los elementos que entran en juego mediante:
 - Métodos basados en la iniciación de grietas;
 - Métodos basados en la propagación desde un defecto;
 - Métodos combinados de iniciación y propagación de grietas.

Para ello se estudia un problema sencillo cuyos resultados y conclusiones permitan extrapolar a situaciones más complejas que sean de interés industrial a mayor escala.

Por otro lado, el hecho de utilizar un tipo concreto de lenguaje computacional, no ligado a aplicación alguna salvo a sí mismo, conlleva una serie de ventajas e inconvenientes que se irán desvelando a lo largo de este trabajo. La programación en C++.NET forma parte de una tecnología que ha cambiado la filosofía de los programadores de unos años hasta ahora: la programación orientada a objetos (OOP). El hecho de basar la estructura de programación en objetos, permite hacer uso de éstos independientemente de su

implementación. De esta forma el desarrollo de la programación puede aprovecharse sin modificar la existente. La versatilidad y comodidad de manejo que presenta la biblioteca de clases .NET Framework¹¹ hace posible integrar un complejo modelo de programación (a base de implementar métodos de marcado carácter técnico) con un entorno visual que favorezca el uso de la aplicación (a través del comportamiento similar a las aplicaciones desarrolladas bajo el S.O.¹² Windows¹³).

¹¹ .NET Framework es propiedad de Microsoft, la biblioteca de clases es de libre distribución.

¹² S.O. = Sistema Operativo.

¹³ Windows es marca registrada de Microsoft.