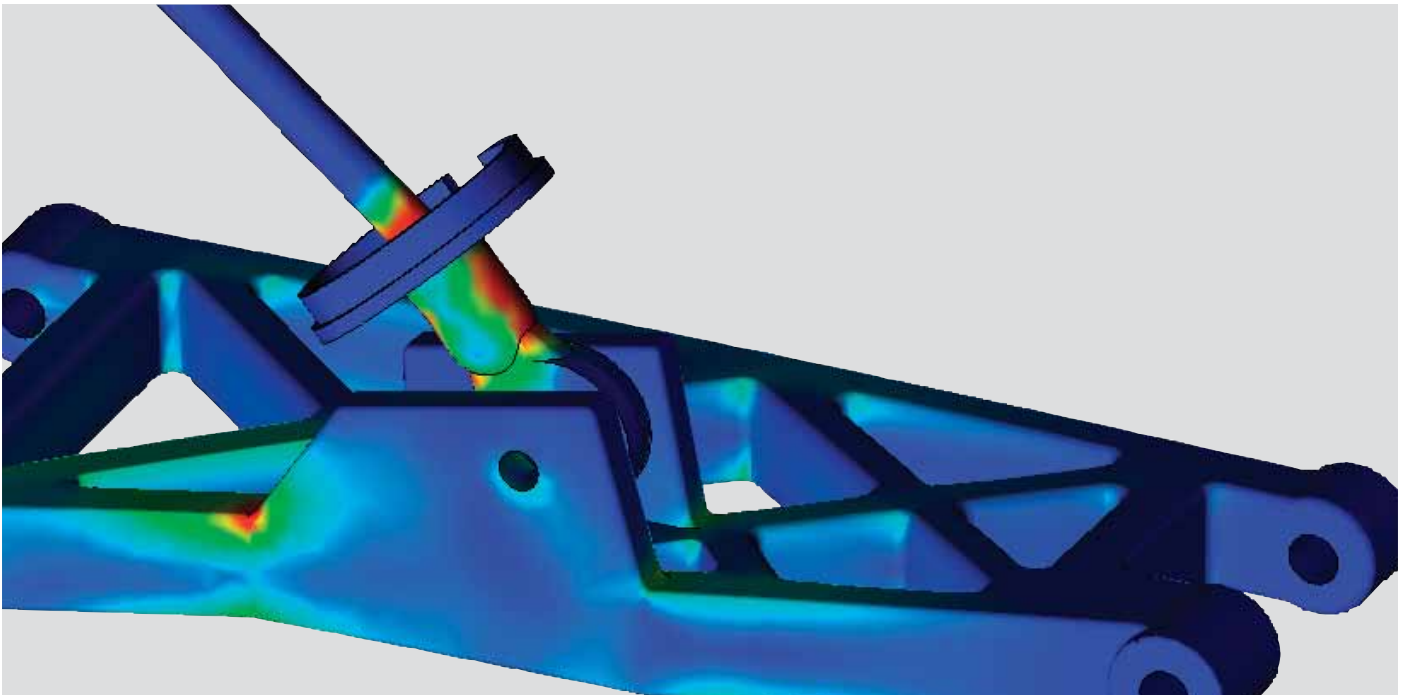

DISEÑO PARA EVITAR LA FATIGA

Resumen

En 1954, dos accidentes en los que se vio involucrado el primer avión de pasajeros del mundo, el de Havilland *Comet*, llevaron las palabras "fatiga del metal" a los titulares periodísticos, y se quedaron grabadas en la conciencia del público. El avión, además de ser uno de los primeros en poseer una cabina presurizada, tenía ventanas cuadradas. La presurización, en combinación con cargas en vuelo repetidas, provocó la formación de fisuras en las esquinas de las ventanas. Estas fisuras se extendieron con el paso del tiempo hasta que se desintegró la cabina. Los accidentes del *Comet* fueron una tragedia humana en la que murieron 68 personas, pero también permitieron tomar conciencia del problema a los ingenieros que intentaban realizar diseños seguros y sólidos.



Desde entonces, la fatiga ha sido responsable del fallo de muchos componentes mecánicos como, por ejemplo, turbinas y otros equipos rotatorios que funcionan bajo intensas cargas cíclicas repetidas.

La principal herramienta para comprender, predecir y evitar la fatiga es el análisis por elementos finitos (FEA).

¿Qué es la fatiga?

Normalmente, los diseñadores consideran que el factor de seguridad más importante es la resistencia global del componente, ensamblaje o producto. Para ello, quieren crear un diseño que aguante la carga final probable y agregarle un factor de seguridad como garantía adicional.

Sin embargo, durante el funcionamiento, es poco probable que el diseño experimente cargas estáticas. Normalmente, experimentará una variación cíclica y será sometido a varias aplicaciones de esta variación de carga, lo que podría provocar fallos con el paso del tiempo.

La fatiga es “la deficiencia que se produce cuando un elemento se somete a una carga repetida o variable, que nunca alcanza un nivel suficiente como para provocar un error en una aplicación individual”. Los síntomas de la fatiga son las fisuras que se producen como consecuencia de la deformación plástica en zonas localizadas. Normalmente, esta deformación tiene que ver con la aparición de zonas de concentración de tensión sobre la superficie de un componente, o bien un defecto preexistente casi indetectable sobre la superficie o justo debajo de ella. Si bien puede resultar difícil o incluso imposible crear un modelo de este tipo de defectos mediante el FEA, la variabilidad de los materiales es un elemento constante y es muy probable que existan defectos pequeños. El FEA puede predecir las zonas de concentración de tensión y ayudar a que los ingenieros de diseño pronostiquen cuánto tiempo aguantarán sus diseños antes de que comiencen a experimentar los síntomas de la fatiga.

El mecanismo de la fatiga puede dividirse en tres procesos relacionados entre sí:

1. Aparición de fisuras
2. Propagación de fisuras
3. Fractura

El análisis de tensiones por elementos finitos (FEA) puede predecir la aparición de fisuras. Existen otras tecnologías, como el análisis dinámico por elementos finitos no lineal, que pueden estudiar los problemas de deformación unitaria en la propagación. Dado que los ingenieros de diseño por lo general quieren evitar que se comiencen a producir fisuras de fatiga, este informe se centrará principalmente en la fatiga desde este punto de vista. Para obtener más información sobre la expansión de las fisuras de fatiga, consulte el Apéndice A.

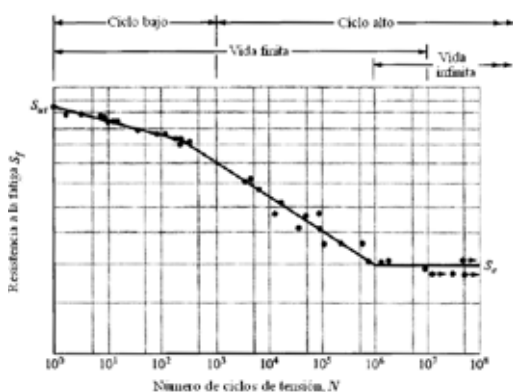
La fatiga es “la deficiencia que se produce cuando un elemento se somete a una carga repetida o variable, que nunca alcanza un nivel suficiente como para provocar un error en una aplicación individual”.

Determinación de la resistencia a la fatiga de los materiales

Existen dos factores principales que rigen la cantidad de tiempo que tarda una fisura en producirse y en extenderse lo suficiente como para provocar el fallo de un componente: el material del componente y el campo de tensión. Los métodos para comprobar la fatiga de materiales se remontan a August Wöhler, quien durante el siglo XIX, estableció y realizó la primera investigación sistemática sobre la fatiga. Las pruebas de laboratorio estándar aplican cargas cíclicas como, por ejemplo, flexión por rotación, flexión en voladizo, tracción y compresión axial y ciclos de torsión. Los científicos e ingenieros trazan los datos resultantes de estas pruebas para demostrar la relación entre cada tipo de tensión y el número de ciclos de repetición que provocan el fallo; es decir, una curva S-N. A partir de la curva S-N, los ingenieros pueden obtener el nivel de tensión que puede soportar un material durante un número específico de ciclos.

La curva se divide en fatiga de ciclo bajo y alto. Por lo general, la fatiga de ciclo bajo se produce en menos de 10.000 ciclos. La forma de la curva depende del tipo de material probado. Algunos materiales como, por ejemplo, aceros de bajo contenido de carbono, muestran un aplanamiento en un nivel de tensión específico, que se denomina límite de resistencia o de fatiga. Los materiales que no contienen hierro no demuestran ningún límite de resistencia. En principio, los componentes diseñados de modo que las tensiones aplicadas no superen el límite de resistencia conocido no deberían presentar fallos durante su funcionamiento. No obstante, en los cálculos del límite de resistencia no se incluyen las concentraciones de tensión localizadas que pueden provocar la aparición de las fisuras, a pesar de que el nivel de tensión se encuentre por debajo del límite "seguro" normal.

Los métodos para comprobar la fatiga de materiales se remontan a August Wöhler, quien durante el siglo XIX, estableció y realizó la primera investigación sistemática sobre la fatiga.

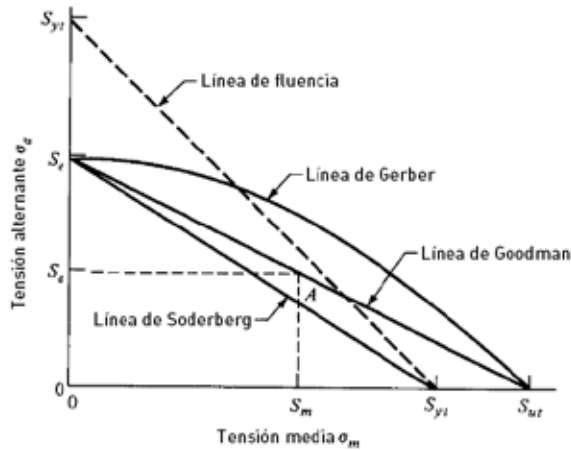


Ejemplo de una curva S-N (tensión frente a ciclos)

Un ciclo de carga de fatiga, según se determina mediante la realización de pruebas de flexión por rotación, proporciona información sobre la tensión media y alternante. Se ha demostrado que la velocidad de propagación de fisuras en las pruebas está relacionada con la relación de tensión del ciclo de carga y la tensión media de la carga. Las fisuras sólo se propagan bajo cargas de tracción. Por ese motivo, si el ciclo de carga provoca una tensión de compresión en la zona de la fisura, no se producirán daños adicionales. No obstante, si la tensión media muestra que el ciclo completo de tensión es de tracción, el ciclo completo provocará daños.

Un gran número de ciclos de carga de servicio tendrán una tensión media distinta de cero. Se han desarrollado tres métodos de corrección de la tensión media para eliminar la necesidad de tener que realizar pruebas de fatiga en tensiones medias diferentes:

- **Método de Goodman:** normalmente adecuado para material frágil
- **Método de Gerber:** normalmente adecuado para material dúctil
- **Método de Soderberg:** normalmente el más conservador



Métodos de corrección media

Los tres métodos se aplican únicamente cuando todas las curvas S-N asociadas se basan en cargas completamente invertidas. Además, estas correcciones sólo serán significativas si los ciclos de carga de fatiga aplicados poseen tensiones medias elevadas en comparación con el intervalo de tensión. El anterior diagrama de Goodman muestra la relación entre la tensión alternante, los límites de tensión del material y la tensión media de las cargas.

Los datos experimentales demuestran que el criterio de fallo se encuentra entre las curvas de Goodman y de Gerber. Por lo tanto, un enfoque pragmático sería calcular el fallo según ambas curvas y utilizar la respuesta más conservadora.

Métodos para calcular la vida en fatiga

Queda claro que las pruebas físicas no son prácticas para todos los diseños. En la mayoría de las aplicaciones, un diseño con una vida segura en fatiga requiere la predicción de la vida en fatiga de los componentes que explique las cargas y los materiales de servicio pronosticados.

Los programas de ingeniería asistida por ordenador (CAE) para determinar la vida en fatiga total. Éstos son:

Resistencia a la tensión (SN)

Se basa únicamente en los niveles de tensión y utiliza sólo el método Wöhler. Aunque no es adecuado para componentes con zonas de plasticidad y proporciona una baja precisión para la fatiga de ciclo bajo, es el método más fácil de implementar, dispone de una amplia cantidad de datos de referencia y ofrece una buena representación de la fatiga de ciclo alto.

Las empresas desean y necesitan reducir el peso y el uso de materiales, así como evitar que se produzcan fallos debido a la fatiga que, aunque no sean mortales, pueden ser muy costosos. Todos estos factores han contribuido a que la realización de estudios de ingeniería de la fatiga sea mucho más importante en los inicios del proceso de diseño.

Resistencia a la deformación unitaria (EN)

Este método proporciona un análisis más detallado de la deformación plástica en zonas localizadas y es adecuado para las aplicaciones de fatiga de ciclo bajo. No obstante, los resultados no son concluyentes.

Mecánica de la fractura elástica lineal (LEFM)

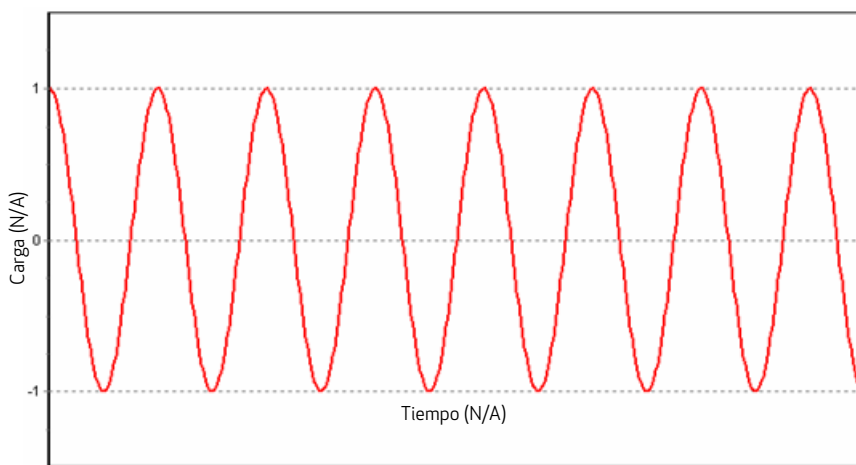
Este método supone que la fisura ya existe y que se ha detectado. Predice la expansión de la fisura en relación con la intensidad de la tensión. Puede ser un método práctico cuando se aplica a estructuras de gran tamaño junto con códigos informáticos e inspecciones regulares.

Gracias a su facilidad de implementación y a la gran cantidad de datos de material disponible, el método que más se utiliza es el SN.

Cálculo de la vida en fatiga para diseñadores mediante el método SN

Al calcular la vida en fatiga, se puede tener en cuenta la carga de amplitud constante y variable. A continuación se incluye una descripción breve de los resultados variados.

Carga de amplitud constante:



Carga de amplitud constante

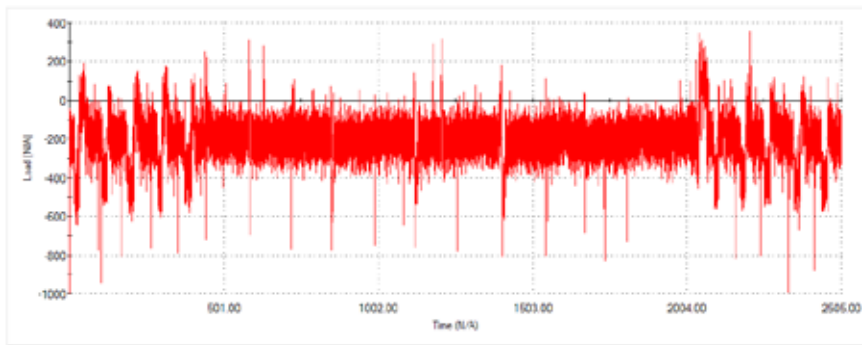
Este método considera un componente sometido a una amplitud constante y con un ciclo de carga de tensión media constante. Mediante una curva SN, los diseñadores pueden calcular el número de este tipo de ciclos que provoca un fallo rápido del componente.

Sin embargo, en los casos en los que el componente se somete a más de una carga, la regla de Miner proporciona una manera de calcular los daños de cada carga y combinarlos para obtener un valor de daño total. El resultado, denominado "Factor de daños", se expresa como una fracción del fallo. El fallo del componente se produce cuando $D = 1,0$; por lo tanto, si $D = 0,35$, es porque se ha consumido el 35 por ciento de la vida del componente. Esta teoría también supone que los daños que causa un ciclo de tensión son independientes de la ubicación en la que se produce el ciclo de carga y que la velocidad de acumulación de daños no depende del nivel de tensión.

Queda claro que las pruebas físicas no son prácticas para todos los diseños. En la mayoría de las aplicaciones, un diseño con una vida segura en fatiga requiere la predicción de la vida en fatiga de los componentes que explique las cargas y los materiales de servicio pronosticados.

Al calcular la vida en fatiga, se puede tener en cuenta la carga de amplitud constante y variable.

Carga de amplitud variable:



Carga de amplitud variable

En condiciones reales, la mayoría de los componentes se someten a un ciclo de carga variable, tanto desde el punto de vista de amplitud como de tensión media. Por lo tanto, un enfoque mucho más general y realista considera una carga de amplitud variable en la que las tensiones, aunque se repitan con el paso del tiempo, tienen una amplitud variable. De este modo, se pueden dividir en "bloques" de carga. Para resolver este tipo de carga, los ingenieros utilizan una técnica denominada "recuento de Rainflow". El Apéndice B, que trata cómo estudiar los resultados del análisis FEA de fatiga, ofrece información adicional sobre el recuento de Rainflow.

El FEA proporciona excelentes herramientas para estudiar la fatiga con el método SN, ya que la entrada consiste en un campo de tensión elástica lineal y el FEA permite la consideración de posibles interacciones de varios casos de carga. Si se establece para calcular el entorno de carga en el peor de los casos (un enfoque típico), el sistema puede proporcionar varios resultados diferentes de cálculo de fatiga, incluidos los trazados de vida, de daños y de factor de seguridad. Además, el FEA puede proporcionar trazados de la relación de la tensión principal alternante más pequeña dividida por la tensión principal alternante más elevada (denominada trazado de indicador de biaxialidad), además de un gráfico de matriz de Rainflow. Este último es un histograma tridimensional en el que los ejes X-Y representan las tensiones alternantes y medias y el eje Z representa el número de ciclos contados para cada recipiente.

Conclusión

Las herramientas y los métodos que se describen en este informe pueden ayudar a los ingenieros a mejorar la seguridad de los componentes a la vez que reducen los diseños de ingeniería aparatosos y costosos. Al utilizar la tecnología actual para evitar la fatiga, con frecuencia se pueden evitar catástrofes. De manera diaria, un diseño que tiene en cuenta la fatiga reduce los fallos de servicio y ayuda a los ingenieros a concentrarse en el diseño de nuevos productos en lugar de tener que corregir problemas heredados.

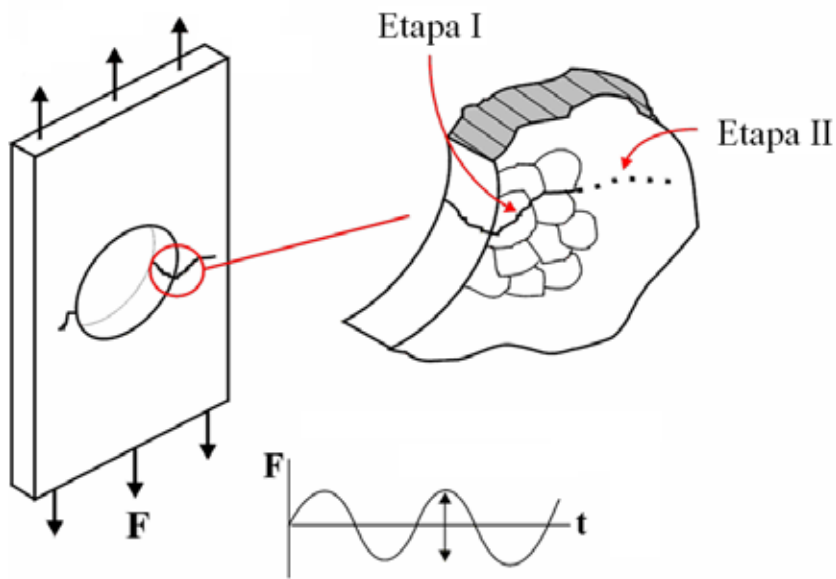
El FEA proporciona excelentes herramientas para estudiar la fatiga con el método SN, ya que la entrada consiste en un campo de tensión elástica lineal y el FEA permite la consideración de posibles interacciones de varios casos de carga

Apéndice A: Expansión de fisuras

Existen dos mecanismos que impulsan el proceso de la expansión de fisuras por fatiga. En una carga cíclica, los planos de deslizamiento de la microestructura del grano de material se desplazan de un lado al otro, provocando extrusiones e intrusiones muy pequeñas en la superficie del componente. Éstas son demasiado pequeñas como para poder verlas (tienen una altura de 1 a 10 micrones), pero pueden considerarse como fisuras embrionarias (Etapa I).

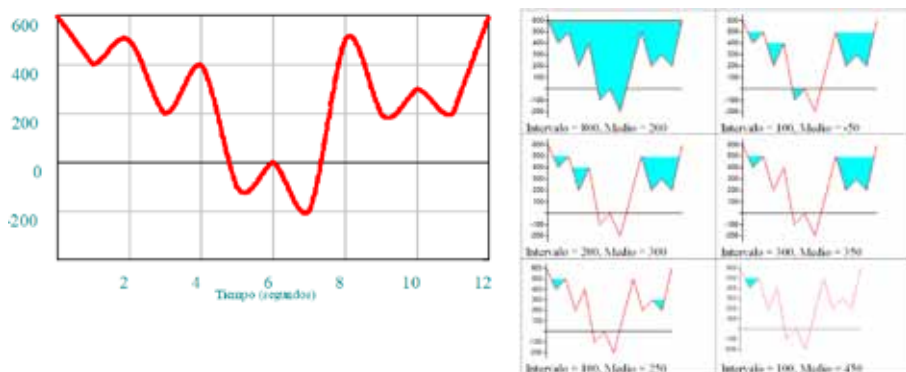
Cuando una fisura de Etapa I alcanza el límite del grano, el mecanismo se transfiere al grano adyacente. Las fisuras de Etapa I se expanden en la dirección del corte máximo, a 45 grados de la dirección de la carga.

Con un tamaño de aproximadamente tres granos, el comportamiento de la fisura cambia, ya que el tamaño de la misma es lo suficientemente grande como para formar una concentración de tensión geométrica (Etapa II). Las fisuras de Etapa II crean una zona plástica de tracción en la punta. Después de este punto, la fisura se expande en dirección perpendicular a la de la carga aplicada.

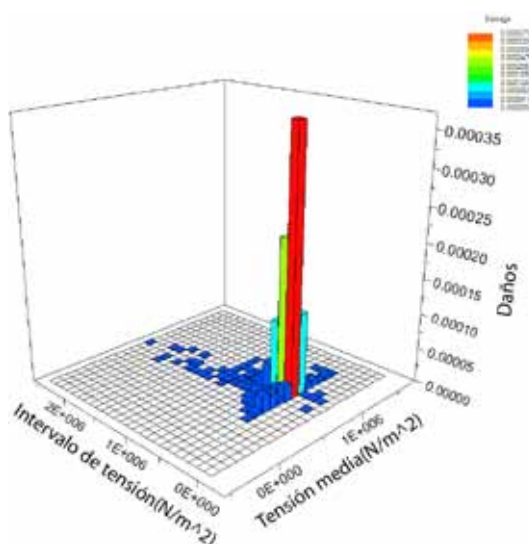


Apéndice B: Recuento de Rainflow

Al realizar una representación gráfica de las diferentes cargas de amplitud y extraer los picos y valles del ciclo de carga, es posible determinar el intervalo de tensión y su tensión media asociada. El gráfico muestra un ciclo de carga "inundado" inicialmente.



El intervalo de tensión y su tensión media asociada se determinan a partir del ciclo de carga que se muestra en el gráfico. En la representación gráfica, el ciclo de carga está "inundado". Una vez determinados el intervalo de tensión y la tensión media, la "lluvia" se vacía del punto más bajo. A continuación, se determinan el intervalo y la media de cada porción restante de "lluvia" atrapada. A partir de los resultados, se puede aplicar la regla de Miner para calcular la vida en fatiga.



Matriz de daños Rainflow

Oficinas Corporativas
Dassault Systèmes
SolidWorks Corp.
300 Baker Avenue
Concord, MA 01742 USA
Teléfono: +1-978-371-5011
Email: info@solidworks.com

Oficinas centrales Europa
Teléfono: +33-(0)4-13-10-80-20
Email: infoeurope@solidworks.com

Oficinas en España
Teléfono: +34-902-147-741
Email: infospain@solidworks.com

