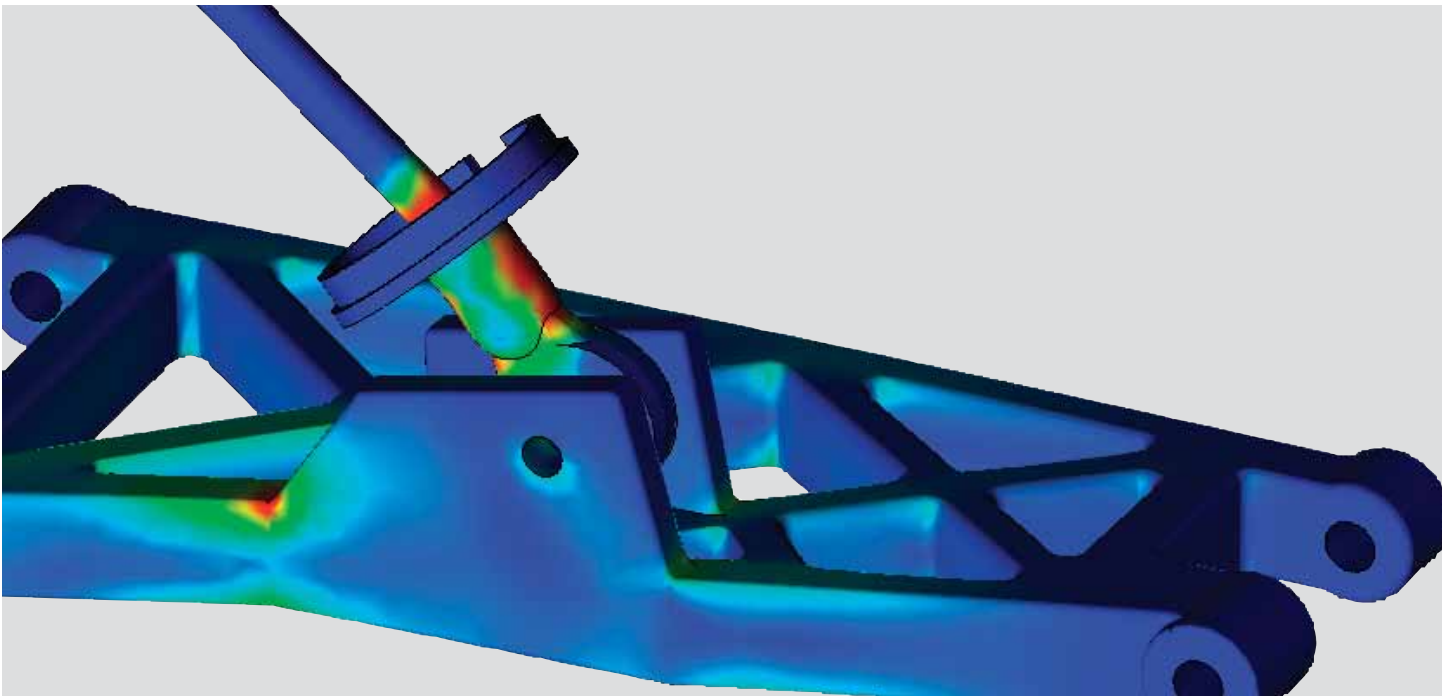

DISEÑO PARA EVITAR LA FATIGA

Resumen

En 1954, dos fallas involucradas en el primer avión comercial del mundo, el de Havilland *Comet*, colocaron las palabras "fatiga del metal" en los encabezados de los periódicos e hicieron que se tomara conciencia sobre este problema. El avión, que también fue uno de los primeros en contar con una cabina presurizada, tenía ventanas cuadradas. La presurización, combinada con cargas repetitivas de vuelo, hizo que se formaran fisuras en las esquinas de las ventanas, y estas fisuras crecieron con el tiempo, hasta que las cabinas se destruyeron. Además de ser una tragedia humana en la que perdieron la vida 68 personas, los desastres del *Comet* fueron una llamada de atención a los ingenieros que trataban de crear diseños seguros y resistentes.



Desde entonces, la fatiga ha sido la base de las fallas en muchos componentes mecánicos, como las turbinas y otros equipos rotatorios que operan bajo cargas intensas, cíclicas y repetidas.

El análisis de elementos finitos (FEA) ha demostrado ser la herramienta principal tanto para comprender como para predecir y evitar la fatiga.

¿Qué es la fatiga?

Los diseñadores normalmente consideran que el factor de seguridad más importante es la resistencia general del componente, ensamble o producto. Para diseñar con esto en mente, los ingenieros quieren crear un diseño que pueda soportar la carga final probable, y agregarle un factor de seguridad, para mayor protección.

No obstante, durante la operación es poco probable que el diseño experimente únicamente cargas estáticas. Con mucha mayor frecuencia, experimentará una variación cíclica, y soportará múltiples aplicaciones de esta variación de carga que, con el tiempo, puede causar fallas.

La definición de fatiga, de hecho, es: falla bajo una carga repetitiva o variable, que nunca alcanza un nivel suficiente para causar una falla en una sola aplicación. Los síntomas de la fatiga son fisuras que se producen como consecuencia de la deformación plástica en áreas localizadas. Esta deformación normalmente resulta de sitios de concentración de esfuerzo sobre la superficie de un componente, o de un defecto ya existente y prácticamente indetectable, sobre la superficie o inmediatamente debajo de ella. Y puede ser muy difícil o aun imposible tratar de modelar esos defectos en el sistema de elementos finitos (FEA), ya que los materiales son variables y pueden aparecer pequeños defectos. El análisis de elementos finitos (FEA) puede predecir las áreas de concentración de esfuerzo y puede ayudar a los ingenieros de diseño a predecir el tiempo probable que van a durar sus diseños antes de sufrir el principio de la fatiga.

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

1. Inicio de la fisura
2. Propagación de la fisura
3. Fractura

El análisis del esfuerzo por medio de elementos finitos puede predecir el inicio de la fisura. Existen otras tecnologías, que incluyen el análisis dinámico no lineal de los elementos finitos, que pueden estudiar los problemas de tensión relacionados con la propagación. Dado que los ingenieros de diseño desean evitar, sobre todo, que se produzcan fisuras de fatiga, este informe se centra principalmente en la fatiga (área borrada). Para obtener una información más detallada sobre el crecimiento de las fisuras de fatiga, por favor consulte el Anexo A.

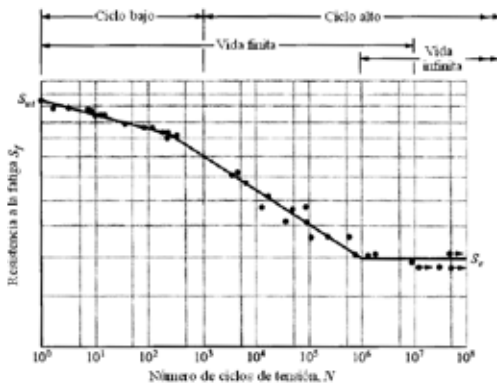
La definición de fatiga, de hecho, es: falla bajo una carga repetitiva o variable, que nunca alcanza un nivel suficiente para causar una falla en una sola aplicación.

Determinación de la resistencia de los materiales a la fatiga

Hay dos factores principales que determinan el tiempo que toma una fisura en producirse y crecer lo suficiente para provocar la falla de un componente: el material del componente y el campo de esfuerzo. Los métodos para determinar la prueba de fatiga de los materiales se atribuyen a August Wöhler, quien en el siglo XIX estableció y realizó las primeras investigaciones sobre la fatiga sistemática. Las pruebas estándar de laboratorio aplican cargas cíclicas como flexión rotativa, flexión cantilever o voladiza, cargas axiales de compresión y tensión, y ciclos de torsión. Los científicos e ingenieros trazan los datos que resultan de estas pruebas, para mostrar la relación de cada tipo de esfuerzo con el número de ciclos de repetición que causan la falla—una curva S-N. Los ingenieros pueden determinar, a partir de la curva S-N, el nivel de esfuerzo que puede soportar un material para un número específico de ciclos.

La curva se divide en fatiga de ciclo bajo y fatiga de ciclo alto. Generalmente, la fatiga de ciclo bajo ocurre a menos de 10.000 ciclos. La forma de la curva depende del tipo de material probado. Algunos materiales, como los aceros bajos en carbono, muestran un aplanamiento en un nivel de esfuerzo específico, al que se conoce como el límite de resistencia o de fatiga. Los materiales que no contienen hierro no muestran un límite de resistencia. En principio, los componentes diseñados para que los esfuerzos aplicados no superen el límite de resistencia conocido no deberían fallar cuando están en servicio. No obstante, los cálculos del límite de resistencia no toman en cuenta las concentraciones de esfuerzo localizadas que pueden dar inicio a las fisuras, a pesar de que el nivel de esfuerzo parezca ser menor al límite “seguro” normal.

Los métodos para determinar la prueba de fatiga de los materiales se atribuyen a August Wöhler, quien en el siglo XIX estableció y realizó las primeras investigaciones sobre la fatiga sistemática.



Ejemplo de una curva S-N (esfuerzo vs. ciclos)

Un historial de la carga de fatiga, determinado mediante pruebas de flexión rotativa, proporciona información sobre el esfuerzo medio y alternante. Se ha demostrado que la velocidad de propagación de las fisuras en las pruebas está relacionada con la proporción del esfuerzo del ciclo de carga y con el esfuerzo medio de la carga. Las fisuras sólo se propagan bajo cargas de tracción. Es por eso que si el ciclo de carga induce un esfuerzo de compresión en el área de la fisura, no producirá daños adicionales. Sin embargo, si el esfuerzo medio muestra que el ciclo completo del esfuerzo es de tracción, todo el ciclo causará daños.

Muchos historiales de carga de servicio tienen un esfuerzo medio que no cae en cero. Se han desarrollado tres métodos de corrección del esfuerzo medio para eliminar la tarea de tener que realizar pruebas de fatiga en diferentes esfuerzos medios:

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



Métodos de corrección de la media

Estos tres métodos se aplican únicamente cuando todas las curvas S-N asociadas se basan en cargas completamente invertidas. Además, estas correcciones sólo cobran importancia si los ciclos de carga de fatiga aplicados tienen esfuerzos medios elevados, comparados con el alcance del esfuerzo. El diagrama anterior, conocido como el diagrama de Goodman, muestra la relación entre el esfuerzo alternante, los límites de esfuerzo de los materiales y el esfuerzo medio de la carga.

Los datos de los experimentos han demostrado que el criterio de las fallas se encuentra entre las curvas de Goodman y las de Gerber. Entonces, un método pragmático calcularía la falla basada en ambas curvas y utilizaría la respuesta más conservadora.

Métodos para calcular la vida de la fatiga

Las pruebas físicas son obviamente poco prácticas para todos los diseños. En la mayoría de las aplicaciones, un diseño de vida de fatiga seguro requiere la predicción de la vida de la fatiga en los componentes, tomando en cuenta las cargas y los materiales de servicio previstos para el componente.

Los programas de ingeniería asistida por computadora (CAE) utilizan tres métodos principales para determinar la vida total de la fatiga. Estos son:

Vida del esfuerzo (SN)

Se basa únicamente en los niveles de esfuerzo y utiliza sólo el método Wöhler. Es más fácil de implantar, dispone de una amplia gama de datos de apoyo y ofrece una buena representación de la fatiga de ciclo alto, aunque no es adecuado para componentes con áreas de plasticidad, y ofrece poca precisión para la fatiga de ciclos bajos.

Vida de la deformación (EN)

Este método proporciona un análisis más detallado de la deformación plástica en regiones localizadas y resulta apropiado para las aplicaciones de fatiga de ciclo bajo. Sin embargo, existen algunas incertidumbres en cuanto a los resultados.

Mecánica de fractura elástica lineal (LEFM)

Este método supone que ya existe una fisura detectada y predice el crecimiento de la misma con relación a la intensidad del esfuerzo. Esto puede ser práctico cuando se aplica a estructuras muy grandes en combinación con códigos por computadora y una inspección periódica.

Dada la facilidad de su implantación y la gran cantidad de datos de materiales disponibles, la vida del esfuerzo (SN) es el método utilizado con mayor frecuencia.

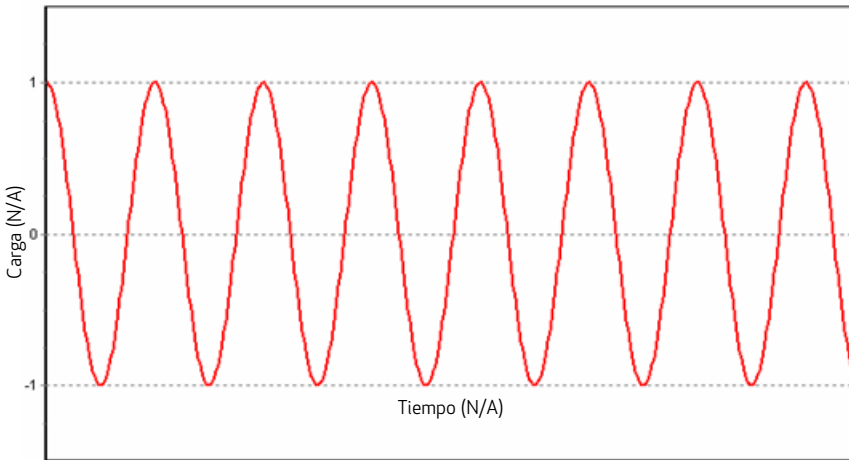
Las empresas desean y necesitan reducir el peso y el uso de materiales, así como evitar que se produzcan fallas debidas a la fatiga, pues aunque no sean fatales, pueden ser muy costosas. Todos estos factores han servido para hacer que los estudios de ingeniería de la fatiga sean mucho más importantes al inicio del proceso de diseño.

Es evidente que las pruebas físicas son imprácticas para todos los diseños. En la mayoría de las aplicaciones, un diseño de fatiga seguro requiere de la predicción de la vida en fatiga tomando en cuenta las cargas y los materiales de servicio predichos para el componente.

Cálculo de la vida de la fatiga para diseñadores utilizando el método SN

Al calcular la vida de la fatiga, debe tenerse en cuenta la carga de amplitud constante y variable. A continuación, se incluye una descripción breve de los resultados que difieren.

Carga con amplitud constante:



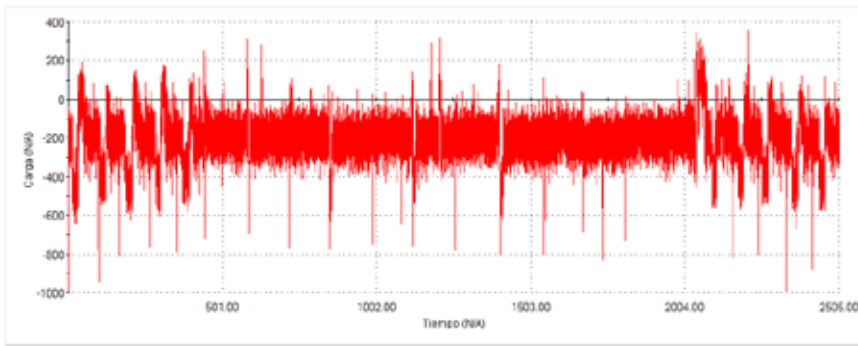
Carga con amplitud constante

Este método considera un componente sometido a una amplitud constante y con un ciclo de carga de esfuerzo con una media constante. Al utilizar una curva del método de la vida del esfuerzo (SN), los diseñadores pueden calcular rápidamente el número de ciclos que causa una falla en el componente.

Sin embargo, en los casos donde el componente es sometido a más de una carga, la Regla Miner ofrece un modo de calcular los daños de cada caso de carga y combinarlos todos para obtener un valor de daño total. El resultado, o "factor de daños", se expresa como una fracción de la falla. La falla del componente se produce cuando $D = 1,0$, por lo que si $D = 0,35$, esto implica que se ha consumido el 35% de la vida del componente. Esta teoría también supone que los daños causados por un ciclo de esfuerzo son independientes de la ubicación en la que se producen en el historial de carga y que la velocidad de acumulación de daños es independiente del nivel de esfuerzo.

Al calcular la vida de la fatiga, debe tenerse en cuenta la carga de amplitud constante y variable.

Carga de amplitud variable:



Carga de amplitud variable

La mayoría de los componentes pasan por cargas variables a lo largo de sus vidas en condiciones reales, con relación a la amplitud, así como al esfuerzo medio. Por consiguiente, un enfoque mucho más general y realista considera una carga de amplitud variable, en la que los esfuerzos, aunque se repitan con el tiempo, tienen una amplitud variable. Así se pueden dividir en “bloques” de carga. Para resolver este tipo de carga, los ingenieros utilizan una técnica denominada “conteo de Rainflow”. El Anexo B, que trata de cómo estudiar los resultados de fatiga del análisis de los elementos de vida limitada, ofrece información adicional sobre el conteo de Rainflow.

El análisis de los elementos de vida limitada proporciona excelentes herramientas para estudiar la fatiga con el método del enfoque de la vida del esfuerzo, ya que la entrada consiste en un campo de esfuerzo elástico lineal y el análisis de los elementos de vida limitada permite la consideración de posibles interacciones de casos de cargas múltiples. Si se establece para calcular el peor entorno de carga, que es un enfoque muy usual, el sistema puede proporcionar un gran número de resultados diferentes de cálculo de fatiga, incluyendo gráficas de vida, gráficas de daños y gráficas de factor de seguridad. Además, el análisis de los elementos finitos puede proporcionar gráficas de la relación del esfuerzo principal alternante más pequeño dividido entre el esfuerzo principal alternante más elevado, llamado trazo de indicador de biaxialidad, además de una gráfica de matriz de Rainflow. Esta es un histograma tridimensional en el que los ejes X e Y representan los esfuerzos alternantes y medios y el eje Z representa el número de ciclos contados para cada celda.

Conclusión

Las herramientas y los métodos que se analizan en esta revisión pueden ayudar a los diseñadores a mejorar la seguridad de los componentes, mientras se reducen los diseños de ingeniería demasiado elaborados, pesados y costosos. Al utilizar la tecnología actual para evitar la fatiga, suele poderse prevenir las catástrofes. De forma cotidiana, un diseño a prueba de fatiga reduce las fallas de servicio y da a los diseñadores mayores oportunidades para diseñar nuevos productos, en vez de arreglar viejos problemas.

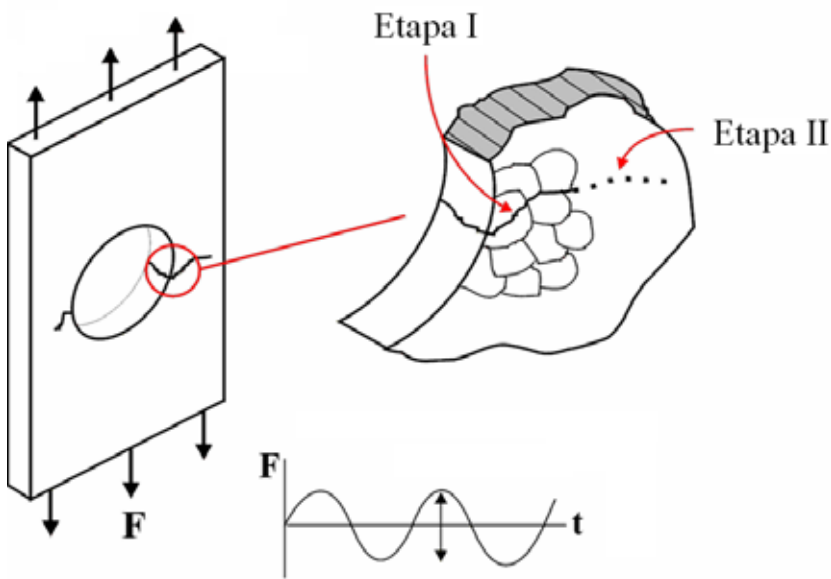
El análisis de los elementos de vida limitada proporciona excelentes herramientas para estudiar la fatiga con el método del enfoque de la vida del esfuerzo, ya que la entrada consiste en un campo de esfuerzo elástico lineal y el análisis de los elementos de vida limitada permite la consideración de posibles interacciones de casos de cargas múltiples.

Anexo A: Crecimiento de las fisuras

Hay dos mecanismos físicos que impulsan el proceso de crecimiento de las fisuras por fatiga. Bajo una carga cíclica, los planos de desplazamiento en la microestructura del grano del material se mueven de un lado al otro, causando microextrusiones e intrusiones en la superficie del componente. Estas son demasiado pequeñas como para verse –miden entre 1 y 10 micrones de altura– pero pueden considerarse como fisuras embrionarias (Etapa I).

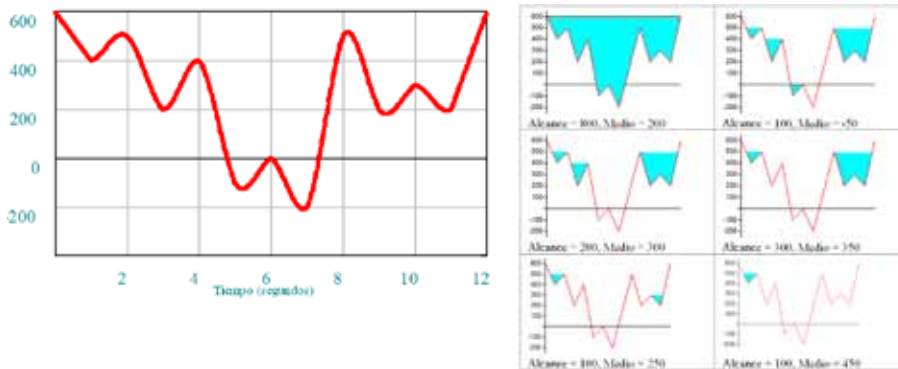
Cuando la fisura en la Etapa I alcanza el límite del grano, el mecanismo se transfiere al grano adyacente. Las fisuras de la Etapa I crecen en dirección al cizallamiento máximo, 45 grados hacia la dirección de la carga.

Con un tamaño aproximado de tres granos, el comportamiento de la fisura cambia, ya que esta ha crecido lo suficiente como para formar una concentración de esfuerzo geométrico (Etapa II). Las fisuras de la Etapa II crean una zona plástica de tensión en la punta. Después de este punto, la fisura crece perpendicular a la dirección de la carga aplicada.

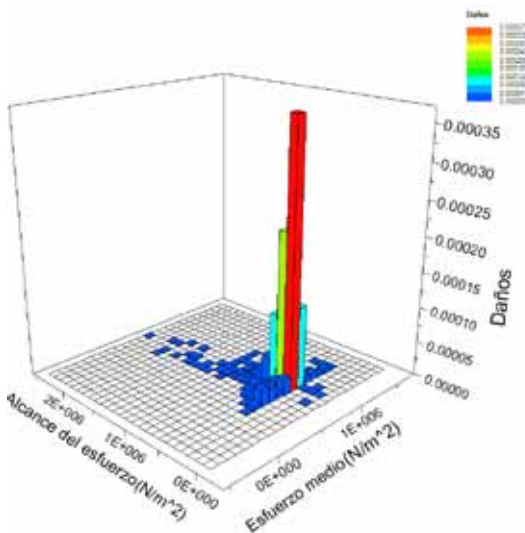


Anexo B: Conteo de flujo de lluvia

Al tomar una representación gráfica de las diferentes cargas de amplitud y extraer los picos y valles del historial de la carga, se hace posible determinar el alcance del esfuerzo y su esfuerzo medio asociado. La gráfica muestra un historial de carga que inicialmente está "lleno de lluvia".



El alcance del esfuerzo y su esfuerzo medio asociado se determinan a partir del historial de carga que se muestra en la gráfica. La historia de carga es un "lleno de lluvia" en la curva de historia de carga. Después de que el rango de esfuerzos normales y medios han sido determinados, son drenados desde los puntos mínimos. 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 Miner para calcular la vida a la fatiga.



Matriz de daños de flujo de lluvia

Oficina Corporativa
Dassault Systèmes
SolidWorks Corp.
300 Baker Avenue
Concord, MA 01742 USA
Tel.: +1-978-371-5011
info@solidworks.com

Oficinas en Latinoamérica
Oficina Central en Brasil: +55 11 3186 4150
Oficina en México: +52 (55) 5211 8844
Oficina en Argentina: +54 911 3621 2379
Email: infola@solidworks.com

