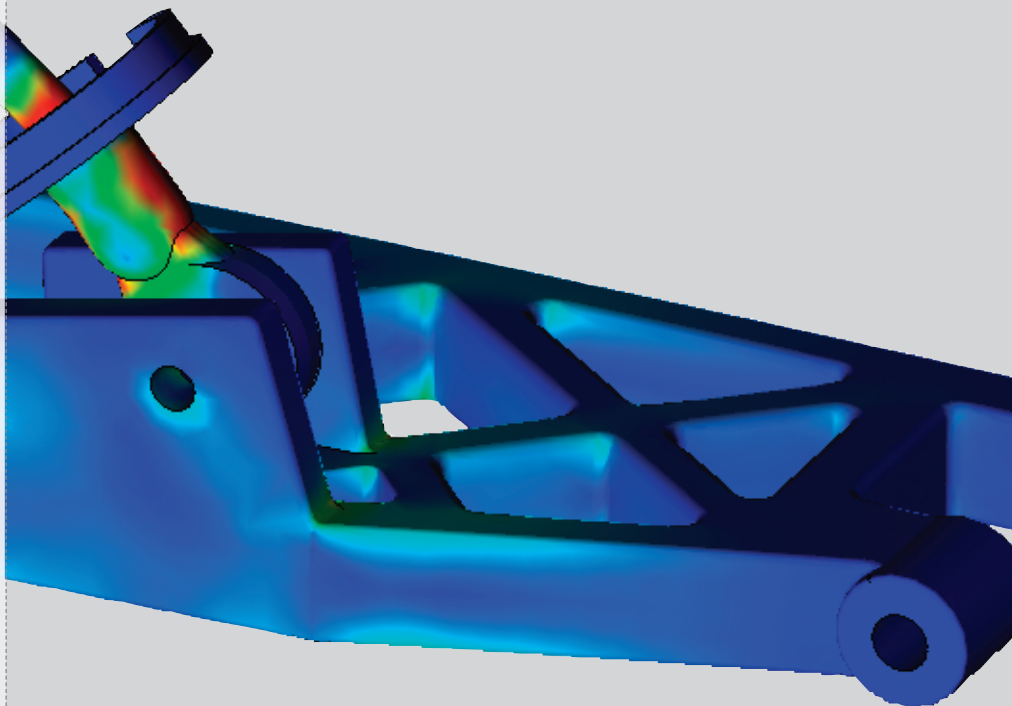


Projetos para impedir a fadiga

COSMOSWorks

SUMÁRIO

Introdução	1
O que é fadiga?	1
Determinação da resistência dos materiais à fadiga	2
Métodos para cálculo da vida da fadiga	4
Cálculo da vida da fadiga para projetistas que usam o método SN	5
Conclusão	6
Apêndice A - Crescimento de rachaduras	7
Apêndice B - Contagem de Rainflow	8



COSMOS®

SolidWorks Corporation



Em 1954, dois acidentes envolvendo a primeira aeronave comercial, o de Havilland Comet, trouxeram as palavras "fadiga do metal" para as manchetes dos jornais e as colocaram permanentemente na consciência das pessoas. A aeronave, também a primeira a dispor de cabine pressurizada, tinha janelas quadradas. A pressurização, combinada com as repetidas cargas de vôos, provocou rachaduras nos cantos das janelas que aumentaram de tamanho ao longo do tempo, até que as cabines se romperam. Além da tragédia com a morte 68 pessoas, os desastres do Comet foram um alerta para os engenheiros tentarem criar projetos resistentes e seguros.

Desde então, a fadiga tem sido detectada como a raiz da falha de muitos componentes mecânicos, como turbinas e outros equipamentos rotativos que operam repetidamente sob cargas intensas e cíclicas.

A principal ferramenta para compreender e ser capaz de prever e evitar a fadiga provou ser a análise de elementos finitos (FEA - Finite Element Analysis).

O que é fadiga?

Projetistas normalmente consideram o fator mais importante de segurança a resistência geral do componente, conjunto ou produto. Para levar isso em consideração, eles deveriam idealizar projetos que suportem a maior carga provável, incluindo um fator de segurança.

Em operação, entretanto, é improvável que um projeto experimente apenas cargas estáticas. Ele será submetido a variações cíclicas com muito mais frequência, com diversas aplicações dessa variação de carga, o que poderá provocar falhas com o tempo.

A definição de fadiga na verdade é: "falha sob uma carga repetida ou variável, que nunca atinge um nível suficiente para provocar falha em uma única aplicação." O sintoma da fadiga é o aparecimento de rachaduras que resultam da deformação plástica em determinadas áreas. Essa deformação normalmente resulta de locais de concentração de tensão na superfície de um componente, ou um defeito preexistente e virtualmente não detectável em sua superfície ou abaixo dela. Embora possa ser difícil ou até impossível modelar esses defeitos na FEA, a variabilidade de materiais é uma constante, e a existência de pequenos defeitos é sempre muito provável. A FEA pode prever as áreas de concentração de tensão, como também auxiliar os engenheiros a prever a durabilidade de seus projetos antes que sofram fadiga.

A definição de fadiga na verdade é: "falha sob uma carga repetida ou variável, que nunca atinge um nível suficiente para provocar falha em uma única aplicação."

Métodos para determinação de testes de fadiga de materiais datam do século 19, quando August Wöhler montou e realizou a primeira investigação sistemática da fadiga.

O mecanismo da fadiga pode ser separado em três processos inter-relacionados:

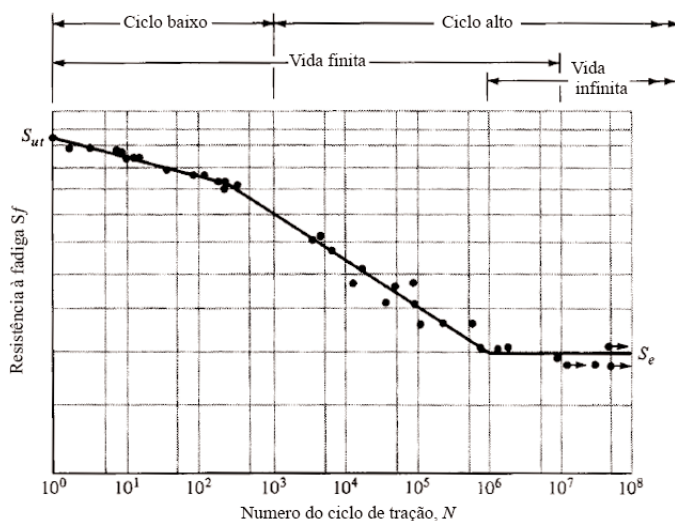
1. Início da rachadura
2. Propagação da rachadura
3. Fratura

A análise de tensão através da FEA pode prever o início da rachadura. Diversas outras tecnologias, entre elas a análise dinâmica não-linear de elementos finitos, podem estudar os problemas de deformação envolvidos na propagação. Como os engenheiros desejam principalmente impedir o aparecimento de qualquer rachadura, este documento trata da fadiga basicamente sob esse ponto de vista. Para consultar uma discussão sobre o crescimento de rachaduras por fadiga, consulte o Apêndice A.

Determinação da resistência dos materiais à fadiga

Dois fatores principais determinam o tempo que leva para uma rachadura se iniciar e crescer suficientemente para provocar a falha do componente: o material do componente e o campo de tensão. Métodos para a determinação de teste de fadiga datam do século 19, quando August Wöhler montou e realizou a primeira investigação sistemática da fadiga. Testes padronizados de laboratório aplicam cargas cíclicas como flexão rotativa, flexão cantilever, vaivém axial e ciclos de torção. Cientistas e engenheiros plotam os dados resultantes desses testes para mostrar o relacionamento entre cada tipo de tensão e o número de ciclos de repetição que conduzem à falha ou curva S-N. Os engenheiros são capazes de obter na curva S-N o nível de tensão suportado por um determinado material para um número específico de ciclos.

A curva é dividida em fadiga de ciclo alto e baixo. Geralmente a fadiga de ciclo baixo ocorre com menos de 10.000 ciclos. A forma da curva depende do tipo de material testado. Alguns materiais, como os aços com baixo teor de carbono, exibem um achatamento em um determinado nível de tensão, conhecido como limite de fadiga. Materiais que não contêm ferro não apresentam limite de fadiga. Por princípio, componentes projetados de forma que as tensões aplicadas não excedam o limite conhecido de fadiga não devem apresentar falhas em serviço. Entretanto, os cálculos de limite de fadiga não levam em consideração as concentrações localizadas de tensão que podem dar início a rachaduras, embora o nível de tensão pareça estar abaixo do limite "seguro" normal.



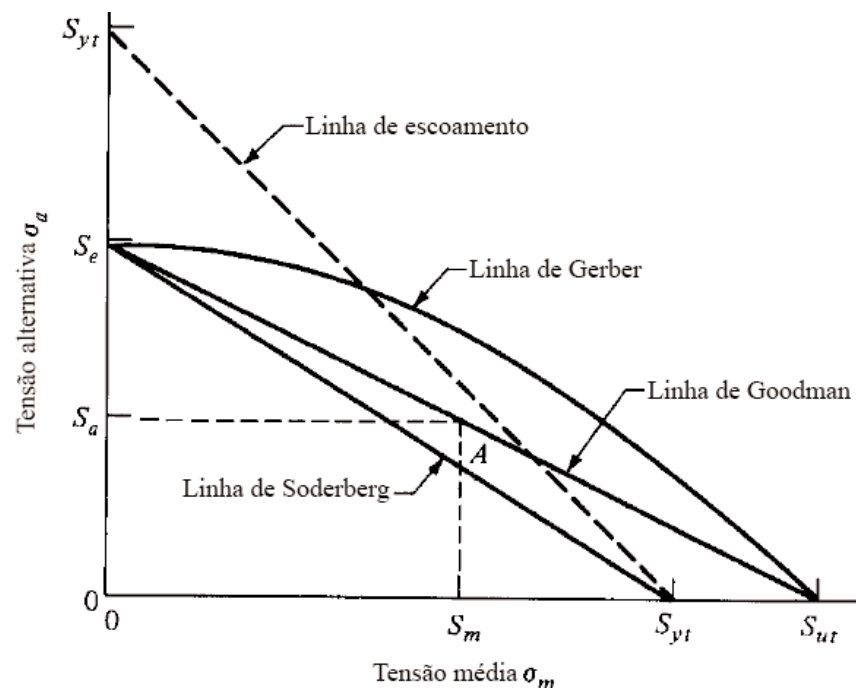
Exemplo de curva S-N (Tensão x ciclos)

As empresas desejam e precisam reduzir peso e uso de material e ainda evitar falhas devido à fadiga, que, mesmo não sendo fatais, podem ser muito caras. Todos esses fatores serviram para tornar os estudos de engenharia de fadiga muito mais importantes no início do processo de projeto.

O histórico de carga de fadiga, como determinado por testes de flexão rotativa, fornece informações sobre tensões médias e alternativas. Os testes mostraram que a razão de propagação da rachadura está relacionada com a razão de tensão do ciclo de carga e a tensão média da carga. As rachaduras se propagam somente sobre cargas de tração. Por essa razão, se o ciclo de carga induz tensões compressivas na área da rachadura, ele não provocará mais danos. Entretanto, se a tensão média demonstrar que o ciclo completo é de tração, o ciclo inteiro provocará danos.

Muitos históricos de cargas em serviço apresentam uma tensão média diferente de zero. Foram desenvolvidos três métodos para correção de tensão média a fim de eliminar o trabalho de realizar testes de fadiga sob diferentes médias de tensão:

- Método de Goodman** - normalmente adequado para materiais quebradiços.
- Método de Gerber** - normalmente adequado para materiais dúcteis.
- Método de Soderberg** - normalmente o mais conservador.



Métodos de correção média

Todos esses métodos são aplicáveis apenas quando todas as curvas S-N associadas se baseiam na aplicação de carga totalmente revertida. Além disso, essas correções se tornam significativas somente se os ciclos de carga de fadiga aplicados apresentarem tensões médias grandes em relação à faixa de tensões. O diagrama abaixo, denominado diagrama de Goodman, mostra o relacionamento entre tensão alternativa, limites de tensão do material e tensão média da carga.

Dados experimentais têm indicado que o critério de falha se posiciona entre as curvas de Goodman e de Gerber. Dessa forma, uma abordagem pragmática calcularia a falha com base em ambas as curvas, adotando a resposta mais conservadora.

Testes físicos não podem ser aplicados de maneira prática a todos os projetos. Na maioria das aplicações, o projeto de vida livre de fadiga exige que se leve em consideração as cargas previstas em serviço e os materiais empregados nos componentes.

Métodos para calcular a vida da fadiga

Testes físicos não podem ser aplicados de maneira prática a todos os projetos. Na maioria das aplicações, o projeto de vida livre de fadiga exige que se leve em consideração as cargas previstas em serviço e os materiais empregados nos componentes.

Programas de engenharia auxiliada por computador (CAE - Computer-Aided Engineering) utilizam três métodos principais para determinar a vida total da fadiga. São eles:

- **Método de vida de tensão (SN)**

Ele se baseia somente nos níveis de tensão e utiliza apenas o método Wöhler. Embora inadequado para componentes com áreas de plasticidade, e oferecendo uma precisão deficiente para fadiga de ciclo baixo, ele é o método mais fácil de implementar, possui grande quantidade de dados de suporte e oferece uma boa representação da fadiga de ciclo alto.

- **Vida de deformação (EN)**

Essa técnica oferece uma análise mais detalhada da deformação plástica em regiões localizadas, sendo satisfatória para aplicações em fadiga de ciclo baixo. Entretanto, existem incertezas quanto ao resultado.

- **Mecânica de fratura elástica linear (LEFM)**

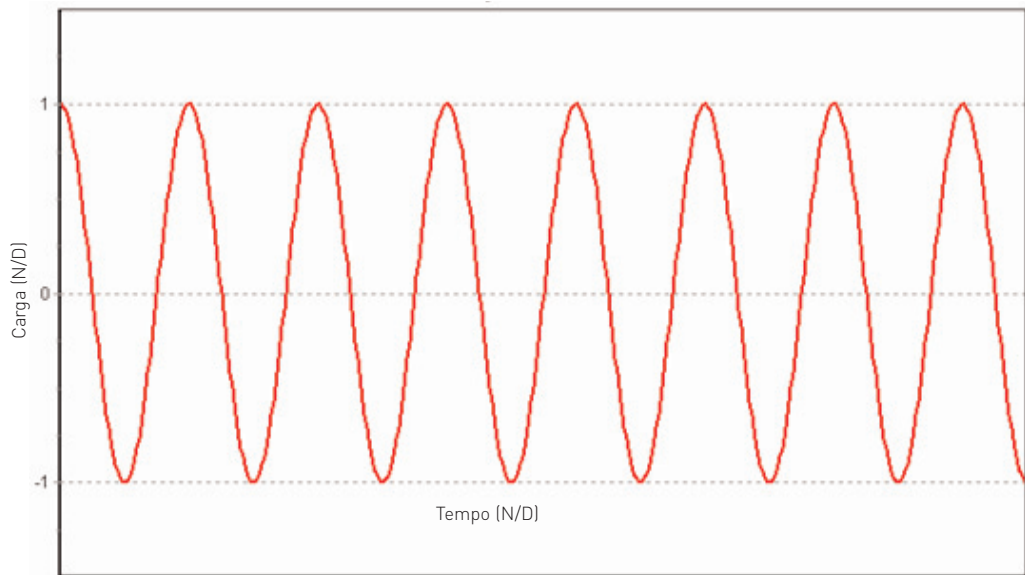
Esse método assume que uma rachadura já está presente e foi detectada, e prevê seu crescimento em relação à intensidade da tensão. Essa metodologia pode ser prática quando aplicada a grandes estruturas juntamente com códigos de computador e inspeções periódicas.

O método mais utilizado é o SN, devido à facilidade de implementação e à grande quantidade de dados materiais disponível.

Cálculo da vida da fadiga para projetistas que usam o método SN

Cargas constantes e de amplitude variável podem ser consideradas no cálculo da vida de fadiga. A seguir apresentamos uma breve descrição dos diferentes resultados.

Aplicação de carga com amplitude constante:

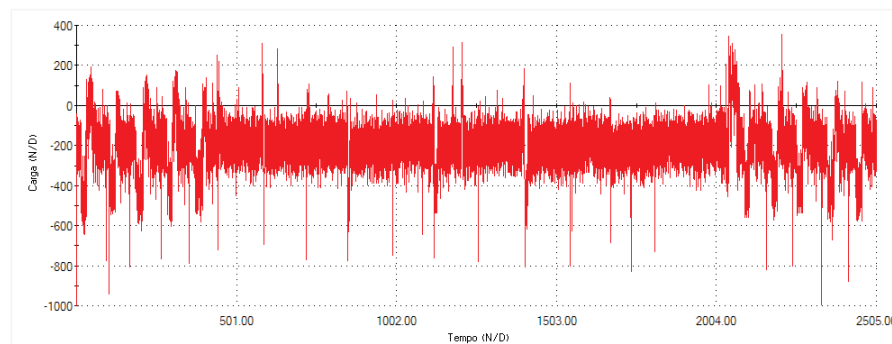


Aplicação de carga com amplitude constante

Cargas constantes e de amplitude variável podem ser consideradas no cálculo da vida de fadiga.

Esse método assume que o componente está sujeito a um ciclo de carga de tensão média e com amplitude constante. Com a utilização da curva SN, os projetistas podem calcular rapidamente o número de ciclos até ocorrer a falha. Entretanto, nos casos onde o componente estiver sujeito a mais de uma situação de carga, a Regra de Miner fornece uma maneira para se calcular os danos de cada uma e combinar todas de modo a obter o valor total de danos. O resultado, o "Fator de dano", é expresso como uma fração da falha. A falha de um componente ocorre quando $D = 1,0$. Portanto, se $D = 0,35$, isto significa que 35% da vida do componente foi consumida. Essa teoria também assume que o dano causado por um ciclo de tensão é independente de onde ele ocorre no histórico de carga e a razão de acumulação de danos é independente do nível de tensão.

Carga de amplitude variável:



A maioria dos componentes apresenta um histórico de cargas variáveis em termos de amplitude e tensão média em condições reais. Assim, uma metodologia muito mais genérica e realista considera a aplicação de cargas nas quais as tensões, embora repetidas ao longo do tempo, possuem amplitude variável, o que permite a sua divisão em "blocos" de carga. Para resolver esse tipo de aplicação de carga, os engenheiros utilizam uma técnica denominada "Contagem de Rainflow". O Apêndice B, que discute como estudar os resultados de FEA de fadiga, apresenta mais informações sobre essa técnica.

A FEA oferece ferramentas excelentes para o estudo da fadiga através da metodologia SN. Como a entrada consiste em um campo de tensão elástica linear, a FEA permite considerar as possíveis interações de vários casos de carga.

A análise de elementos finitos (FEA) oferece ferramentas excelentes para o estudo da fadiga através da metodologia SN. Como a entrada consiste em um campo de tensão elástica linear, a análise FEA considera as possíveis interações de vários casos de carga. Se o sistema for configurado para calcular o ambiente no pior caso de aplicação de carga, (uma metodologia típica), ele pode gerar os mais variados cálculos de fadiga, incluindo gráficos de vida, de danos e de fator de segurança. Adicionalmente, a FEA pode fornecer o gráfico da razão entre a menor e a maior tensão alternativa principal, denominado gráfico indicador de biaxialidade, bem como o gráfico da matriz de Rainflow. Este último é um histograma em 3D no qual os eixos X e Y representam a tensão alternativa e a tensão média, e o eixo Z representa o número de ciclos contados para cada compartimento.

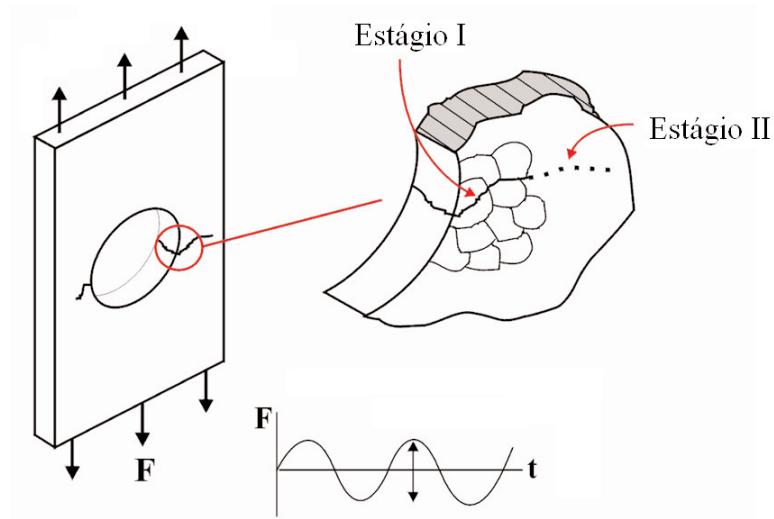
Conclusão

As ferramentas e metodologias discutidas nesta análise podem auxiliar os projetistas a aprimorar a segurança de componentes ao mesmo tempo em que reduzem projetos com excessos, pesados e caros. Catástrofes podem ser freqüentemente evitadas com a utilização de tecnologia moderna. No dia-a-dia, os projetos que levam em consideração a questão da fadiga, reduzem as falhas e oferecem aos projetistas mais oportunidades de se dedicarem à criação de novos produtos em vez de perderem tempo solucionando problemas antigos.

Apêndice A - Crescimento de rachaduras

Existem dois mecanismos físicos atuando no processo do crescimento das rachaduras. Sob uma carga cíclica, planos deslizantes na micro-estrutura do grão do material se movem para frente e para trás, provocando microextrusões e intrusões na superfície do componente. Isso é pequeno demais para ser visualizado (apenas 10 microns de altura), mas podem ser consideradas rachaduras embrionárias (Estágio I). Quando a rachadura no Estágio I atinge as bordas do grão, o mecanismo se transfere para o grão adjacente. As rachaduras no Estágio I crescem na direção do cisalhamento máximo, atingindo 45 graus na direção da aplicação da carga.

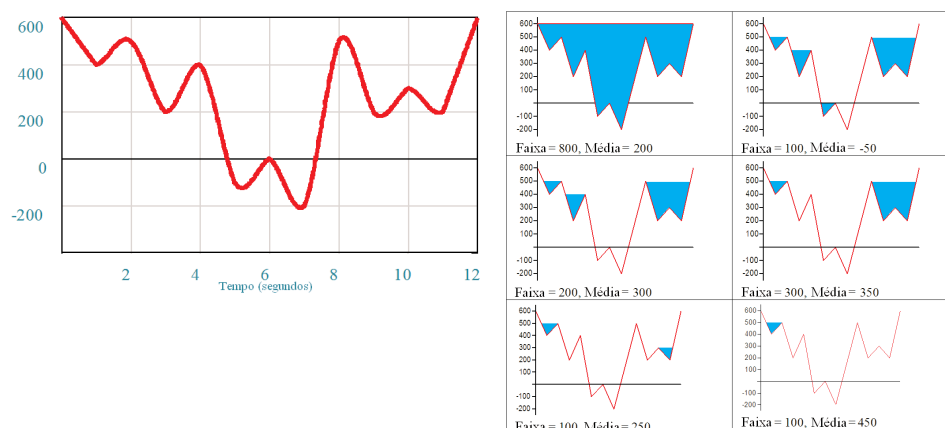
Quando a rachadura atinge o tamanho de aproximadamente três grãos, seu comportamento se altera por ela ter se tornado grande o suficiente para formar uma concentração geométrica de tensão (Estágio II). Quando as rachaduras no Estágio II criam uma zona de tração plástica em sua extremidade e, além desse ponto, crescem na direção perpendicular ao da carga aplicada.



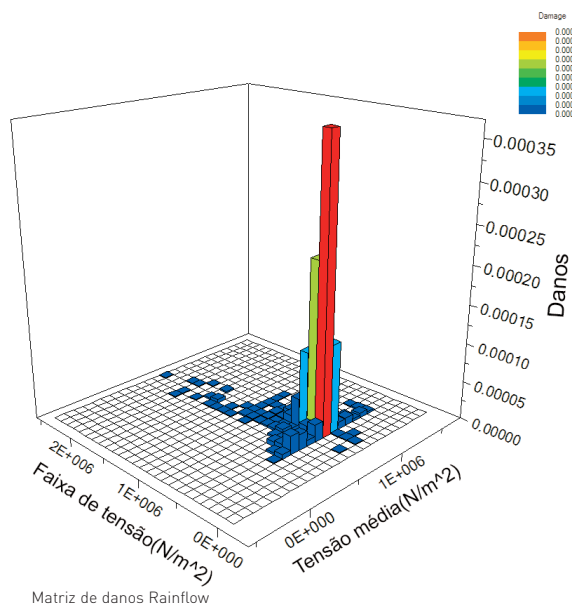
Estágios de propagação da rachadura

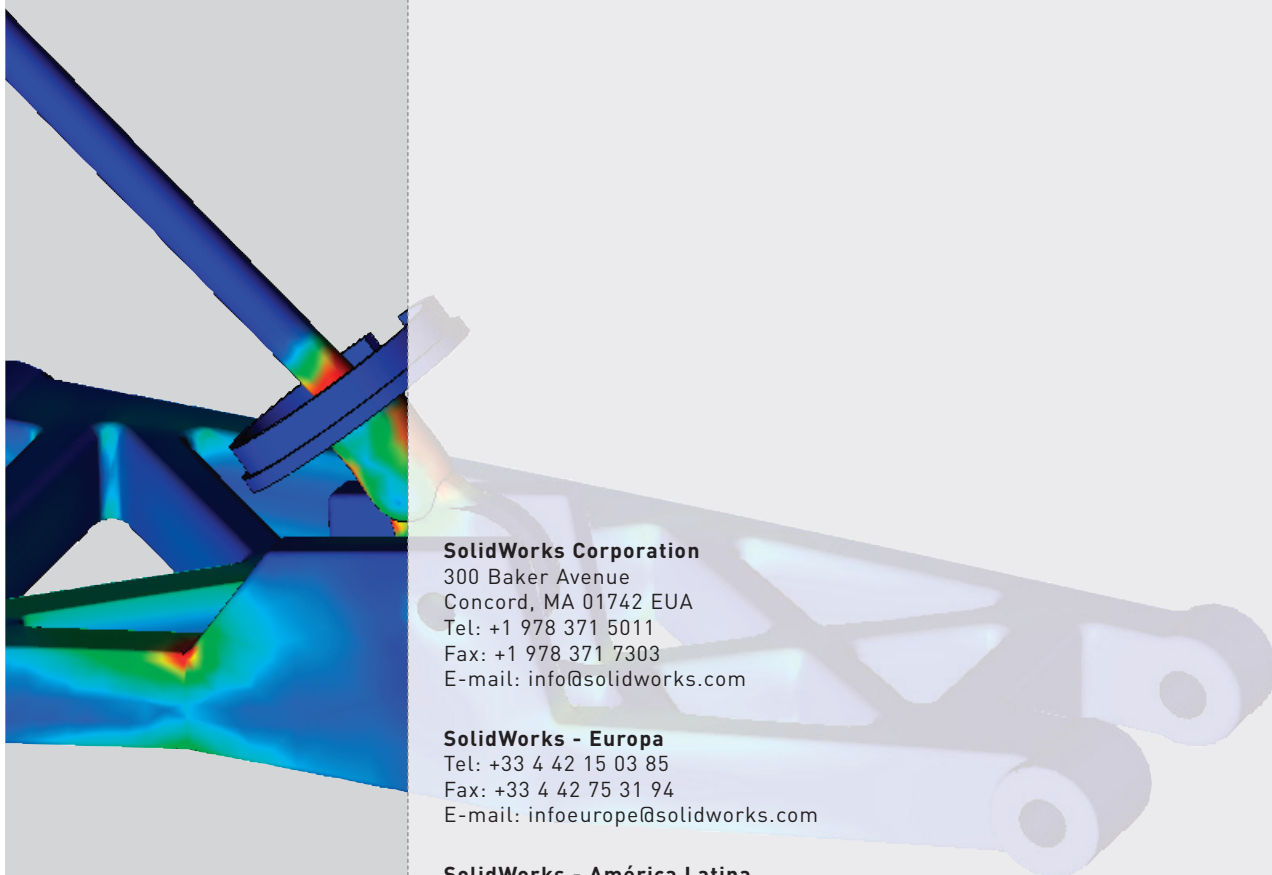
Apêndice B - Contagem de Rainflow

Com a representação gráfica de cargas de amplitude variável e extraindo os picos e vales do histórico de cargas, é possível determinar a faixa de tensão e a tensão média associada. O gráfico mostra um histórico de carga "cheio de chuva".



A faixa de tensão e a tensão média associada são determinadas a partir do histórico de carga mostrado no gráfico. O histórico de carga está "cheio de chuva" em sua representação gráfica. Após definir a faixa de tensão e a tensão média, a "chuva" é drenada a partir do ponto mais baixo. A faixa e a média de cada parte remanescente da "chuva" aprisionada são então determinadas. A partir dos resultados é possível aplicar a Regra de Miner e calcular a vida da fadiga.



**SolidWorks Corporation**

300 Baker Avenue
Concord, MA 01742 EUA
Tel: +1 978 371 5011
Fax: +1 978 371 7303
E-mail: info@solidworks.com

SolidWorks - Europa

Tel: +33 4 42 15 03 85
Fax: +33 4 42 75 31 94
E-mail: infoeurope@solidworks.com

SolidWorks - América Latina

Tel: +55 11 3186 4150 ou 0800 772-4041
Fax: +55 11 3186 4170
E-mail: infola@solidworks.com

COSMOS

3000 Ocean Park Blvd
Suite 2001
Santa Monica CA 90405 EUA
Telefone: 1 800 469 7287
Fora dos Estados Unidos: +1 310 309 2800
Fax: +1 310 309 2801
E-mail: info@srac.com

COSMOS®

Para obter informações adicionais sobre os produtos COSMOS,
visite o site do COSMOS em <http://www.cosmosm.com>.

**SolidWorks Corporation**

SolidWorks é uma marca registrada da SolidWorks Corporation. COSMOS é uma marca registrada da Structural Research and Analysis Corporation. Todos os outros nomes de empresas e produtos são marcas comerciais ou marcas comerciais registradas dos seus respectivos proprietários.
©2006 Structural Research and Analysis Corporation. Todos os direitos reservados.