

## ESTUDO DO FENÔMENO DA FADIGA UTILIZANDO O SOFTWARE ANSYS.

Felipe Antonio Carreirinha Mendes, Fernando de Azevedo Silva – Departamento de Mecânica – Faculdade de Engenharia – Campus de Guaratinguetá.

Cerca de 99% das falhas mecânicas são devidas ao fenômeno da fadiga, que consiste na fragilização progressiva da seção resistente de uma peça devido ao crescimento de trincas causado por solicitações flutuantes. Independente da tenacidade do material, a ruptura por fadiga é sempre frágil e sem escoamento substancial. Essa característica torna a análise da fadiga importante em projetos de responsabilidade.

As trincas de fadiga se iniciam em pontos de concentração de tensão como pequenos defeitos na estrutura cristalina, riscos na superfície ou mesmo intensificadores de tensão como furos, roscas, rasgos e qualquer outra descontinuidade da peça, que possa alterar como a tensão se distribui na seção da peça. Esses intensificadores de tensão propiciam o surgimento de escoamentos pontuais nas respectivas regiões, formando um encadeamento de planos de deslizamento que culminam na formação de uma trinca, sendo que em uma peça pode haver mais de um ponto de nucleação de trinca. O tempo necessário para a formação das trincas varia para cada tipo de material. Para materiais dúcteis esse tempo corresponde à cerca de 70% da vida da peça enquanto para materiais quebradiços, a maior parte da vida em fadiga corresponde ao próprio período de propagação da trinca.

Após atingir um certo tamanho a trinca passa a crescer na direção normal à tensão de tração, dando início à fase conhecida como propagação, na qual a cada ciclo de tensão completo a trinca aumenta. O processo de crescimento da trinca é lento e gradual, podendo levar um elevado número de ciclos até a ruptura da peça. No entanto, após o comprometimento da resistência da seção afetada pelas trincas, a ruptura ocorre de maneira frágil e inesperada – uma vez que não apresenta sinais de falha eminente, como escoamentos e estricções notáveis.

O objetivo da análise de fadiga é exatamente prever ou determinar a vida de um componente sujeito à fadiga, para que este possa se romper em segurança, ou mesmo, ser substituído antes de sua falha. Nossa tarefa consistiu em verificar os resultados obtidos para a vida de um corpo de prova submetido a um determinado carregamento ou seu fator de segurança (no caso de vida infinita).

Utilizamos neste presente estudo o software comercial ANSYS para a obtenção da vida em fadiga de um corpo de prova cilíndrico rebaixado através de um raio de adoçamento (figura 1). Analisamos o corpo de prova em duas situações distintas: tração e flexão. Nas duas análises os corpos foram submetidos a cargas alternadas, ou seja, módulo da tensão máxima igual ao módulo da tensão mínima, sendo, portanto, a tensão média igual a zero. Paralelamente à simulação foi realizado o cálculo da vida em fadiga do componente analiticamente para posterior comparação.

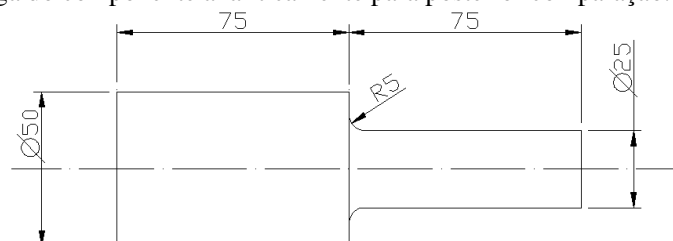


Figura 1 – Corpo de prova analisado.

Para realizar a análise de fadiga pelo software ANSYS, precisamos primeiramente inserir o modelo da peça no software. Para tanto, podemos modelá-la no próprio programa, ou importá-la de algum programa de CAD mais completo. Para peças de média e baixa complexidade a modelagem no software ANSYS se torna viável e prática.

Inserida a geometria da peça, precisamos especificar o material usado na simulação, bem como suas propriedades mecânicas. Para realizar a análise de fadiga, precisamos também inserir a curva S-N do material utilizado nos corpos de prova (CDP).

A curva S-N relaciona a tensão à qual o CDP utilizado se rompe (S) com o número de ciclos necessários para atingir a ruptura (N). Foi utilizado a curva S-N do aço ABNT 4340 – obtida experimentalmente no laboratório de ensaios da nossa faculdade. Podemos, porém, através da inserção de pontos do diagrama, especificar nossa própria curva S-N.

A curva S-N é plotada em escala mono-log. Observa-se que alguns materiais como os aços de baixa liga, ferros fundidos, ligas de titânio e molibdênio ao atingir um certo nível de tensão, resistem

## ESTUDO DO FENÔMENO DA FADIGA UTILIZANDO O SOFTWARE ANSYS.

Felipe Antonio Carreirinha Mendes, Fernando de Azevedo Silva – Departamento de Mecânica – Faculdade de Engenharia – Campus de Guaratinguetá.

indefinidamente sem se romper. Essa característica apresentada por alguns materiais é conhecida como limite de fadiga. Para outros materiais como aços inoxidáveis, alumínio e ligas de cobre que não apresentam essa peculiaridade adotamos o limite para vida infinita como sendo a resistência à tração para uma vida de  $10^6$  ciclos de carregamento, onde apesar de não haver limite de fadiga, há uma leve inflexão na curva. A curva de fadiga de nosso material também considera vida infinita após  $10^6$  ciclos.

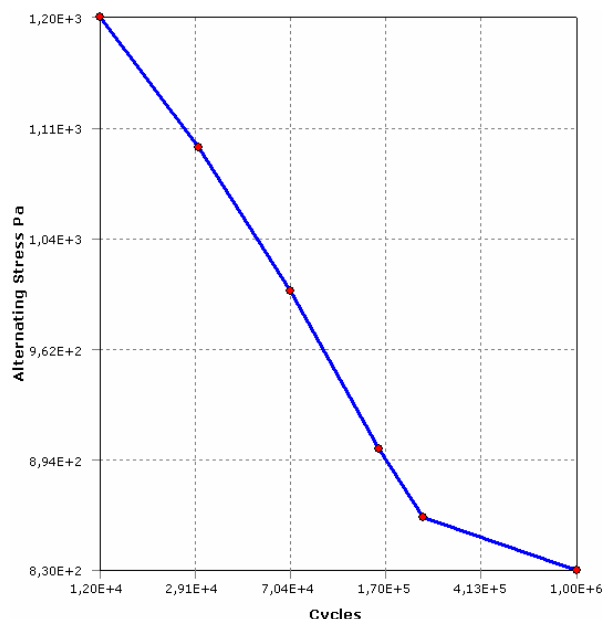


Figura 2 – Curva S-N do Aço ABNT 4340.

O passo seguinte é fornecer os esforços aos quais a peça está sujeita – forças, momentos e pressões – e seus respectivos pontos de aplicação. Pontos de apoio também devem ser inseridos nesta etapa. Para se estudar a fadiga gerada por sollicitações cíclicas, devemos especificar os esforços aos quais a peça está sujeita, fornecer os valores correspondentes ao valor máximo do ciclo de tensão.

Prosseguindo, definimos o tipo de carregamento ao qual submetemos a peça, uma vez que a relação entre tensão e número de ciclos suportados pela peça também é influenciada pelo tipo de carregamento. Para tanto, devemos optar entre carregamentos pulsantes, alternados, ou mesmo repetidos, inserindo a razão de tensão R. Cada tipo de carga cíclica possui uma tensão média diferente. Tensões médias de compressão tendem a prolongar a vida do componente, enquanto tensões médias de tração tendem a encurtá-la. Para estimar a influência da tensão média na vida de cada componente, devemos utilizar diagramas como o de Gerber, Goodman ou Sodeberg, que corrigem a influência da tensão média na curva S-N. Em nosso caso não é preciso, pois utilizamos uma tensão alternada, e conseqüentemente, tensão média nula.

Devemos também especificar o critério utilizado para encontrar a tensão equivalente (componente X, Y, Z, XZ, XY, YZ ou tensão de Von Mises).

Precisamos observar também em nossa análise, que os dados da curva S-N são válidos apenas em condições ideais, ou seja, utilização de um corpo de prova com dimensões adequadas e sem a presença de entalhes e riscos na superfície, sem a presença de agentes corrosivos, e realizado à temperatura ambiente.

Porém, em trabalho, uma peça está sujeita a condições bem mais adversas. Frequentemente, temperatura de operação, acabamento superficial, atmosfera, e dimensões, não seguem os padrões dos corpos de prova. Estes fatores contribuem para a diminuição da resistência à fadiga do material. Portanto, para estimar a vida em fadiga de um corpo de maneira correta, é preciso utilizar diversos coeficientes de correção, que aproximam os resultados obtidos em ensaios de fadiga em laboratório em condições ideais aos valores reais específicos para cada situação de serviço.

## ESTUDO DO FENÔMENO DA FADIGA UTILIZANDO O SOFTWARE ANSYS.

Felipe Antonio Carreirinha Mendes, Fernando de Azevedo Silva – Departamento de Mecânica – Faculdade de Engenharia – Campus de Guaratinguetá.

O coeficiente de carregamento corrige diferenças obtidas entre os resultados de ensaios realizados com força normal, torção e flexão. Permite que usemos a curva S-N obtida por flexão para calcular a resistência à fadiga de materiais sujeitos tanto à flexão, como também por exemplo à tração. Para isso adotamos o coeficiente de carregamento ( $C_{\text{carreg}}$ ) igual a 1 para flexão, igual a 0,7 para tração e 0,577 para torção. É possível também usar a tensão equivalente de Von Mises para estabelecer a relação entre os diferentes tipos de ensaio. Critério este que se torna prático quando trabalhamos com diversos esforços combinados. No cálculo realizado para o software ANSYS, no entanto, devemos inserir o coeficiente de carregamento como 1.

O segundo coeficiente ( $C_{\text{tamanho}}$ ) corrige distorções entre os resultados encontrados para corpos de prova de dimensões padronizadas e peças de dimensões diversas. Para as dimensões do nosso corpo de prova encontramos um valor de aproximadamente 0,814 para este coeficiente.

Para corrigir os efeitos de uma superfície não ideal, utilizamos o coeficiente de superfície, que pode ser calculado através do acabamento do material e sua tensão de ruptura. Para o nosso corpo de prova utilizaremos um acabamento usinado. Poderíamos utilizar também, ao invés do acabamento padronizado, a rugosidade média da superfície ( $R_a$ ).

Em nossos cálculos, consideraremos a temperatura de operação como sendo a temperatura ambiente. Assim, o coeficiente que corrige alterações na temperatura ( $C_{\text{temp}}$ ) vale 1. Para temperaturas diferentes da ambiente, utilizamos um coeficiente de temperatura inversamente proporcional à mesma. Quanto maior a temperatura de operação, menor a resistência à fadiga.

Devido à grande dispersão dos valores obtidos em um ensaio de fadiga, ao utilizarmos a curva S-N para projetar um componente, devemos esperar que algumas peças em um mesmo lote se quebrem com um número de ciclos menor que o esperado. Isso é devido à natureza estatística da curva S-N e também às inevitáveis diferenças microestruturais de cada corpo de prova. Para um melhor controle da quantidade de peças que irão sofrer ruptura antes do planejado, utilizamos um coeficiente de confiabilidade ( $C_{\text{conf}}$ ) que para uma confiabilidade de 99,9% equivale a 0,753. Esse fator utilizado garante que apenas uma peça em um lote de mil irá quebrar antes do número de ciclos projetado.

Mesmo considerando estes coeficientes de redução da vida em fadiga, devemos levar em consideração também a influência da concentração de tensões para este tipo de entalhe. Precisamos determinar, portanto, o fator dinâmico de concentração de tensões ( $k_f$ ).

Para o cálculo de  $K_f$ , devemos calcular inicialmente o fator geométrico de concentração de tensões ( $K_t$ ) segundo a expressão (1), que é função do tipo de carregamento ao qual está submetida a peça e de sua geometria. Para o nosso corpo de prova – eixo cilíndrico com rebaixo – a expressão (2) nos fornece o fator  $K_t$ .

$$K_t = A \left( \frac{r}{d} \right)^b \quad (1) \quad q = \frac{(k_f - 1)}{(K_t - 1)} \quad (2)$$

Na expressão (1), os fatores A e b são tabelados para cada tipo de esforço e para cada relação entre D/d.

Obtido o  $K_t$ , precisamos encontrar um fator chamado sensibilidade ao entalhe (q), que relaciona os fatores  $K_t$  e  $K_f$ , segundo a expressão (2). O fator sensibilidade ao entalhe é obtido graficamente, sendo função da tensão de ruptura do material e do raio do entalhe em questão.

Por fim agrupamos todos estes coeficientes em um único coeficiente K, que será o produto dos coeficientes de tamanho, temperatura, confiabilidade, superfície e carregamento, pelo fator dinâmico de concentração de tensão (expressão 3). O fator K deve ser inserido no módulo de fadiga do programa.

$$K = \frac{(C_{\text{conf}} C_{\text{temp}} C_{\text{sup}} C_{\text{tam}} C_{\text{carreg}})}{K_f} \quad (3) \quad S_n = K S_n' \quad (4)$$

A expressão (4) relaciona a tensão obtida através do diagrama S-N ( $S_n'$ ) e a tensão corrigida ( $S_n$ ) pelos coeficientes representados por K.

Por fim, verificamos nossa malha e conferimos que apresentava refinamento adequado. Em nossas simulações a malha com elementos de dois milímetros gerou - na maioria dos casos - resultados aceitáveis. Foram utilizados 54.171 elementos tetraédricos totalizando 78.046 nós.

## ESTUDO DO FENÔMENO DA FADIGA UTILIZANDO O SOFTWARE ANSYS.

Felipe Antonio Carreirinha Mendes, Fernando de Azevedo Silva – Departamento de Mecânica – Faculdade de Engenharia – Campus de Guaratinguetá.

Após estas etapas, obtivemos a solução do problema. Como resultado encontramos além das tensões e deformações, a vida em número de ciclos e também o fator de segurança da peça.

Para cada carregamento simulado obtivemos o fator de segurança. Comparamos os resultados obtidos com cálculos realizados pela teoria de fadiga, utilizando os mesmos valores para os coeficientes de correção, com exceção do coeficiente de carregamento - que para o software deve ser unitário.

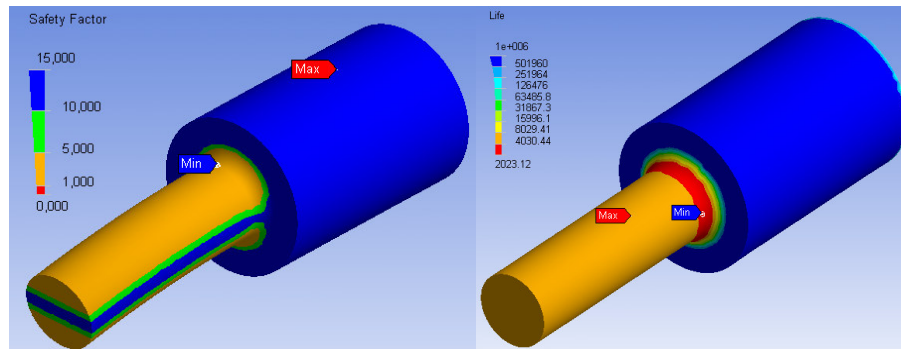


Figura 3 – Simulação de flexão e tração, respectivamente.

A simulação numérica de fadiga via elementos finitos é prática, e útil (principalmente quando trabalhamos com formas complexas). Porém, independente da precisão do programa, é importante que os valores de K fornecidos pelo operador sejam precisos e coerentes com a geometria, acabamento e condições de operação da peça, para que a análise de fadiga realizada pelo software não tome como base dados incorretos. O tamanho da malha também deve ser analisado antes ao se obter a solução do problema, uma vez que malhas muito grosseiras podem resultar em resultados equivocados.

### Referências Bibliográficas

- Norton, Robert L., Projeto de Máquinas, Bookman, 2004 2ª edição.
- Silva, Paulo Anchieta da, determinação do coeficiente geométrico de intensidade de tensões através do método de energia utilizando modelagem por elementos finitos, Unesp, 2005.