

# A mecânica da fratura como base do projeto tolerante ao dano

Normalmente os engenheiros vêem apenas a fratura final e ignoram que pode ter havido uma fase relativamente significativa de propagação de uma trinca com origem no fenômeno da fadiga

Não é tarefa fácil discorrer sobre a mecânica da fratura em cinco ou seis linhas, e menos ainda sobre todo o aparato numérico necessário para a correta descrição do fenômeno. Grande ainda é o número dos que confundem o fenômeno da fadiga com o da mecânica da fratura e menor ainda é o grupo daqueles que sabem que a estratégia de projeto é bem distinta quando se projeta para evitar a fadiga (nucleação de uma trinca) ou quando a intenção é que o projeto seja tolerante ao dano. E é justamente este tipo de equívoco que causou o naufrágio de centenas de “Liberty Ships” no período da segunda grande guerra e ainda hoje faz suas vítimas nas indústrias mecânica, civil e aeronáutica. O que normalmente os engenheiros vêem é a fratura final (o componente quebrado, digamos assim) e o que eles normalmente ignoram é que pode ter havido uma fase relativamente significativa de propagação de uma trinca que teve origem no fenômeno da fadiga. E é justamente nesta propagação que o presente artigo está interessado. O gráfico abaixo ajuda a entender melhor.

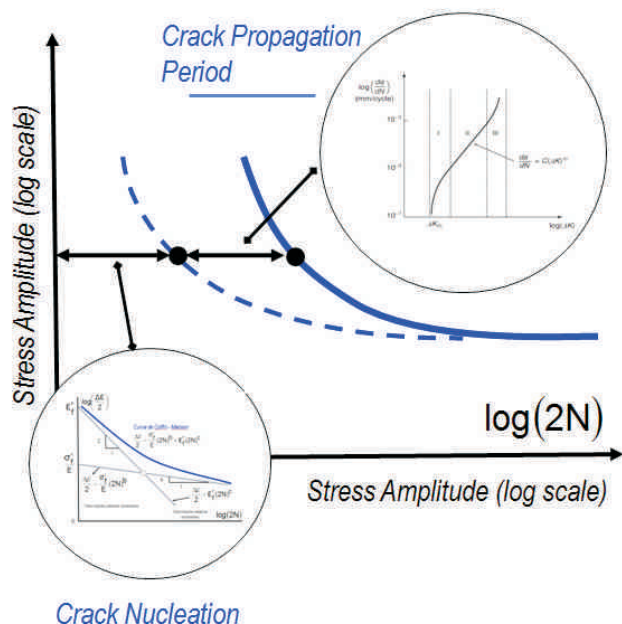


Figura 1 - Estrutura dos comandos necessários

A linha pontilhada marca a nucleação de uma trinca. Fica fácil observar que, para alternadas maiores e baixo número de ciclos, é relevante o estudo da mecânica da fratura e, ainda no mesmo raciocínio, para alto número de ciclos, a distância que separa a nucleação da total fratura é praticamente inexistente e, assim, nestas circunstâncias, o projeto deve reunir esforços no sentido de evitar completamente o surgimento de uma trinca. Em outras palavras, podemos desprezar a mecânica da fratura.

No pioneiro trabalho de A. A. Griffith (1920), o conceito de taxa de liberação da energia de deformação levou ao conceito de fator de intensidade de tensões  $K$ , que em linhas gerais pode ser definido como na equação abaixo:

$$K_I = F S \sqrt{2\pi r}$$

Há uma dependência básica com relação à tensão aplicada e ao fator geométrico  $F$ , que é o item mais delicado da metodologia proposta. Esse fator  $K$ , vale dizer, é um parâmetro muito importante para a correta compreensão da “severidade”, digamos assim, de uma determinada trinca instalada. Este valor pode ser diretamente comparado com os limites de tenacidade à fratura dos materiais empregados. Para os metais, geralmente, estes valores se encontram dentro do intervalo que vai de 20 a 200 MPa.m<sup>1/2</sup>. Com o aumento do limite de ruptura, dentro de uma determinada classe de materiais, nota-se ainda que há um decréscimo nos valores de ( $K_{IC}$ ), seguindo a mesma tendência da ductilidade do material. A fim de calcular os valores de  $K$  ao longo de uma trinca em um determinado componente, utilizaremos o conceito da integral  $J$ , implementado já na versão 11 do ANSYS, podendo ser acessado através do comando CINT, que iremos detalhar a seguir. Basicamente, a integral  $J$  é a extensão do conceito de Griffith para os casos onde há não-linearidade elástica envolvida, como mostra o esboço da figura 2.

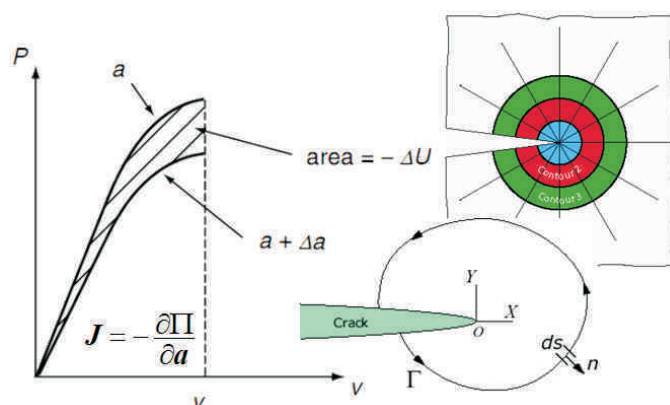


Figura 2 - Modelo de gancho com fratura

Considere agora o modelo apresentado na figura 3, no qual introduzimos uma trinca, tomando o cuidado de gerar uma malha controlada (hexadominante) na região que a envolve. O tipo de elemento empregado é tão importante quanto a densidade elementar, para a fiel representação do campo de tensões, cujo gradiente é elevado por natureza.

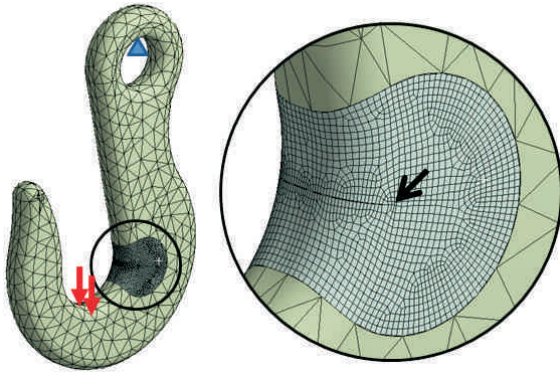


Figura 3 - Modelo de gancho com fratura

Se os valores de tensão obtidos forem comparados diretamente, vale dizer, com os limites de escoamento e ruptura do material, corremos o sério risco de superestimar a severidade do carregamento imposto, em função da singularidade matemática envolvida.

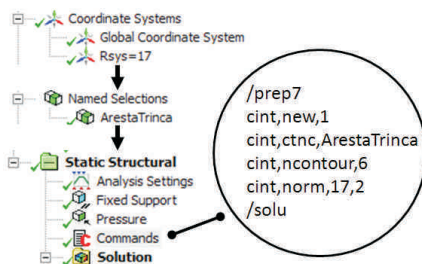


Figura 4 - Estrutura dos comandos necessários

O primeiro passo, no Workbench, é a definição de um sistema de coordenadas local numa das faces da trinca, o que na figura 4 é mostrado como sistema (Rsys=17). É preciso ainda definir um grupo contendo os nós que pertencem à aresta da trinca a ser estudada. Ainda na figura 4 tem-se a sequência com os seis comandos necessários para o cálculo da integral J. O argumento (NEW) define uma trinca a ser calculada, relativa ao componente "ArestaTrinca" (CTNC), que nada mais é que um conjunto de nós. (NCONTOUR) solicita que o cálculo da integral J seja realizado em uma determinada quantidade de contornos. E o argumento (NORM) faz a escolha do vetor e do sistema de coordenadas relacionados à superfície livre da trinca.

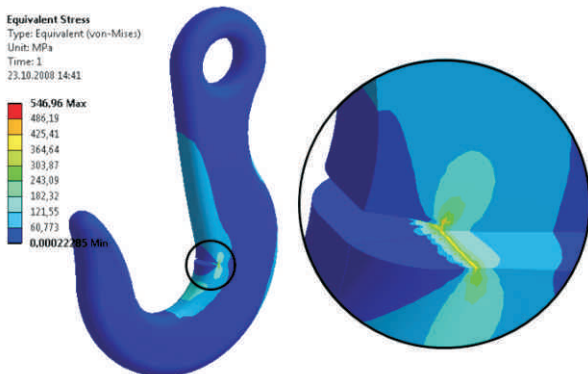


Figura 5 - Gradiente das tensões equivalentes de Von Mises

A julgar pelos valores das tensões equivalentes de Von Mises (figura 5), por exemplo, um material como o aço MAN-TEN, com limite de ruptura na casa de 450MPa, já estaria seriamente comprometido.

Para este mesmo material, contudo, o ( $K_{Ic}$ ) é cerca de 6320 MPa.(mm<sup>1/2</sup>). Também na figura 6 temos uma idéia do forte gradiente em torno da trinca, com altíssimas tensões de natureza trativa, cuja distribuição é extremamente dependente da qualidade da malha utilizada.

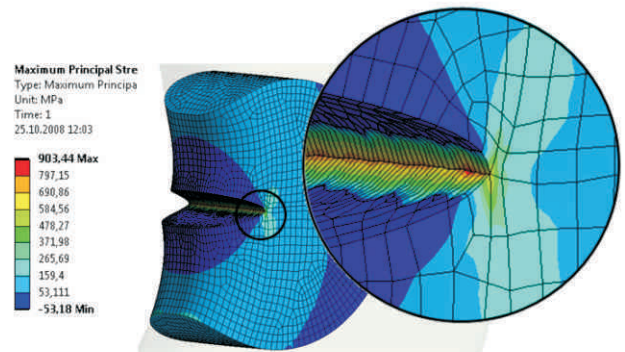


Figura 6 - Gradiente das tensões máximas principais ( $\sigma_1$ )

Os valores de  $K_I$ , para o componente acima, está distribuído, ao longo da trinca existente, conforme a curva da figura abaixo.

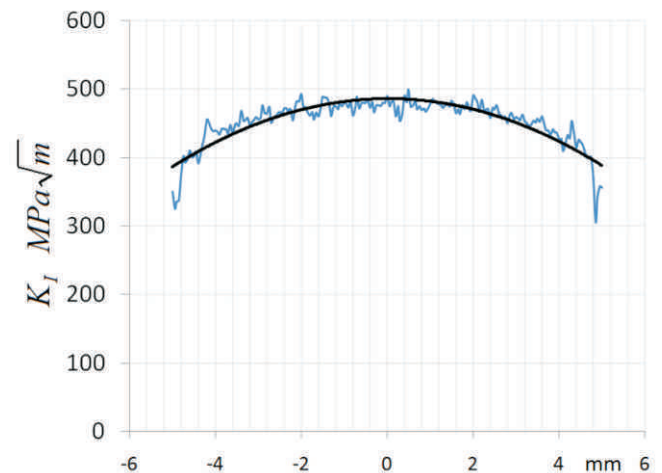


Figura 7 - Distribuição de K ao longo da trinca

A oscilação observada é numérica, antes de mais nada, e está relacionada à qualidade da discretização e dos elementos utilizados para representar a região de dominância K.

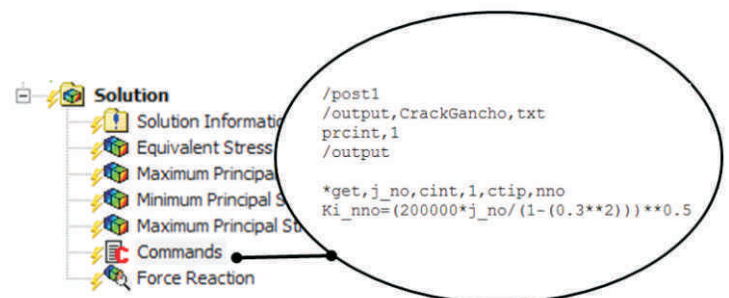


Figura 8 - Estrutura dos comandos necessários

Na figura 8 são apresentados os mínimos comandos necessários para acessar o valor da integral J e convertê-lo ao valor de K para um determinado nó pertinente à fratura estudada. O comando (/OUTPUT, CrackGancho, txt) direciona a saída de texto para o arquivo (CrackGancho.txt). O comando (PRCINT, 1), na figura 9, diz ao

ANSYS que escreva o valor da integral J correspondente à cada nó pertinente à (ArestaTrinca) no arquivo (CrackGancho.txt).

```

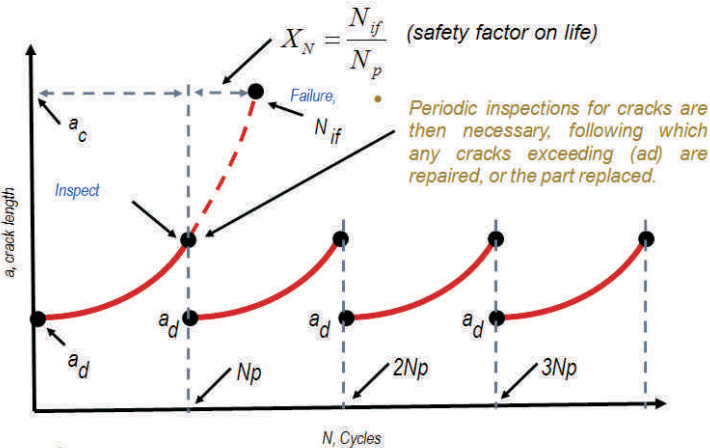
CrackGancho.txt - Notepad
File Edit Format View Help
***** POST1 J-INTEGRAL RESULT LISTING *****
CrackID = 1
Crack Front Node =29884
Contour Values = 0.57363      0.62805      0.59984      0.59245
Contour Values = 0.59224      0.59691
Crack Front Node =*****
Contour Values = 0.57976      0.62607      0.72364      0.78865
Contour Values = 0.84489      0.86907
Crack Front Node =30174
Contour Values = 0.52701      0.68963      0.70724      0.73230
Contour Values = 0.80110      0.82873
    
```

Figura 9 - Saída de dados (Integral J) do comando (PRCINT)

O acesso aos valores da integral J também podem ser feitos através do comando (\*GET). No exemplo citado na figura 8, é solicitado ao ANSYS que escreva o valor da integral J da trinca de número (1) do nó (NNO) na variável (J\_NO). O restante é apenas parte da sintaxe do comando. Ainda na figura 8, a equação disponível é responsável por converter os valores da integral J para o valor de  $K_I$ . Basicamente:

$$J = G = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E}$$

Estes comandos devem ser repetidos para cada um dos nós do componente (ArestaTrinca), através, por exemplo, da utilização dos comandos de loop (\*DO / \*ENDDO). Aqui recomendamos que o usuário familiarize-se um pouco mais com a estrutura da linguagem APDL (ANSYS Programming Design Language).



The term damage-tolerant design is used to identify this approach of requiring that structures be able to survive even in the presence of growing cracks.

Figura 10 - Conceito de Projeto Tolerante ao Dano empregado para determinação dos intervalos de manutenção

Com os recursos disponíveis no ANSYS é possível, portanto, julgar a severidade de uma trinca ou um defeito, através da comparação dos valores de  $K_I$  com os valores da tenacidade à fratura do material utilizado na fabricação do componente. Outra pergunta ainda a ser respondida, dentro do mesmo tema da “mecânica da fratura”, seria a de quantos ciclos seriam necessários para levar a trinca existente até o estado de completa fratura do componente, ou, em outras palavras, chegar até o ponto em que a trinca possui o chamado “tamanho crítico”,

ponto no qual os valores de  $K_I$  para o material atingiriam o valor necessário para fratura frágil (figura 10).

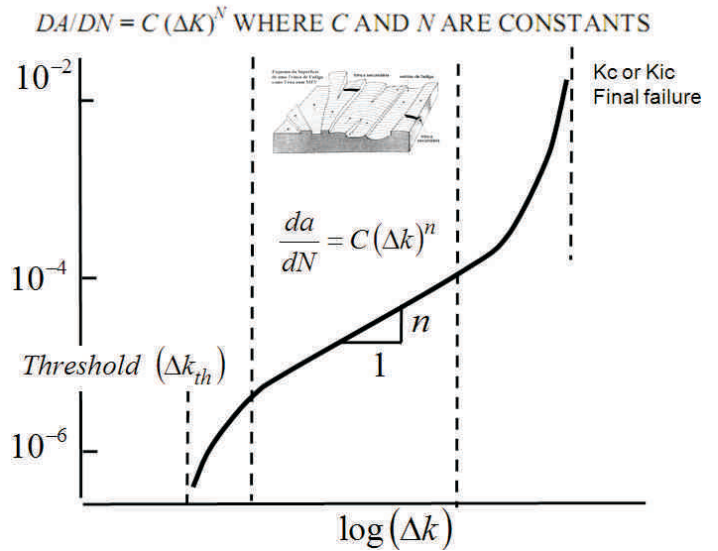


Figura 11 - Lei de propagação de Paris

Para responder a esta pergunta é necessário o estudo da propagação da trinca, o que envolve uma nova teoria e metodologias, que o ANSYS em bem pouco tempo será capaz de lidar de maneira automática. A figura 11 representa a curva de propagação de um material qualquer. Número de ciclos em função da alternada dos fatores de concentração de tensão ( $\Delta K$ ). Os dois “thresholds” são os dois limites abaixo ou acima dos quais a propagação não ocorre, ou ocorre de maneira frágil e instantânea. A lei de Paris, ainda no mesmo gráfico esboçada, é válida, então, na segunda região.

Como desenvolvimentos futuros, a ANSYS nos apresenta a lista que se segue:

1. T-stress calculation
2. CINT enhancement
  - a. Surface element support
  - b. Inertial loading
  - c. Initial state (initial strain, stress, ...)
  - d. C\* for creep material
3. Crack growth simulation
  - a. Mesh morphing
  - b. Remeshing
4. Workbench meshing
5. Composite fracture

E, assim, podemos finalizar dizendo que a ANSYS está evoluindo de maneira consistentemente sólida, com a intenção de fornecer soluções na mesma medida profundas, em termos teóricos e técnicos, e abrangentes, de forma a garantir que os usuários tenham a melhor solução totalmente integrada do mercado.