

ANÁLISE VIRTUAL DE FADIGA DE ALTO CICLO EM VIRABREQUINS

Palavras-Chave: Motores de combustão interna, Virabrequim, Fadiga numérica, Análise experimental de fadiga

Autores/as:

João Cadorin Falleiros (Bolsista) – FEM/UNICAMP

Renan Nascimento Ferreira (Coautor) – FEM/UNICAMP

Prof.º Dr.º Marco Lúcio Bittencourt (Orientador) – FEM/UNICAMP

INTRODUÇÃO

Este projeto de pesquisa objetiva o estudo e a análise da fadiga de alto ciclo de virabrequim de motores de combustão interna (ver Figura 1). Para isso, busca a correlação entre resultados experimentais e virtuais, por meio de métodos numéricos baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF) e apoiados por metodologias de cálculo da vida em fadiga.

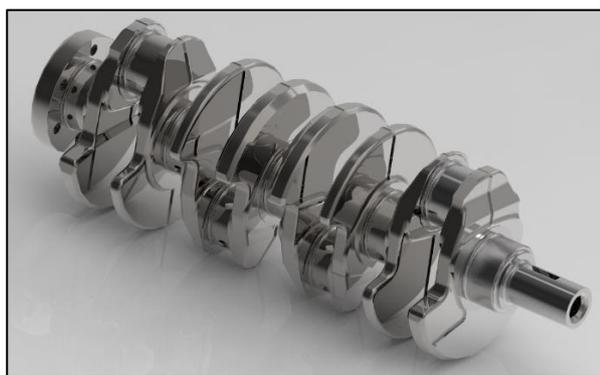


Figura 1 – Virabrequim Automotivo – fonte: autoria própria.

O virabrequim é um dos principais componentes de um motor à combustão interna, estando sujeito a elevados níveis de tensão de flexão e de torção. Devido à elevadas amplitudes de esforços, o

componente está sujeito a falha por fadiga, compreendida por 3 etapas:

1. Nucleação da trinca,
2. Propagação estável da trinca e
3. Propagação instável da trinca.

O fim da terceira etapa indica uma falha catastrófica do componente, indesejada e perigosa, uma vez que pode acarretar perdas humanas, além de gastos elevados para reparos e substituição dos demais componentes afetados.

Os constantes avanços na área da Engenharia Assistida por Computador – CAE tornam essa tecnologia muito atraente para os setores científico e empresarial.

A possibilidade de representar a realidade em um ambiente virtual permite prever determinados comportamentos de um sistema sem a necessidade de extensas validações experimentais. Reduz-se assim gastos excessivos com prototipagem, instrumentação e uso de laboratórios.

Entretanto, a utilização de CAE está sujeita a equívocos de seu usuário, erros derivados de formulações experimentais ou

até erros numéricos. Sendo assim, seu uso não elimina inteiramente a necessidade de execução de experimentos e validações empíricas.

Devido à alta complexidade da geometria do virabrequim e de suas condições de carregamento (flexão e torção), optou-se pela utilização do software de simulação *Ansys Mechanical*, o qual permite replicar as condições reais em um modelo virtual, prevendo assim, seu comportamento estrutural.

A mecânica da fratura é uma ciência fundamental para a concretização da pesquisa, sendo complexa e dependente de diversas variáveis. A utilização de métodos empíricos combinados a tratamentos estatísticos é muito atraente para as indústrias, pois permite obter previsões de fadiga do componente com alta confiabilidade.

METODOLOGIA

As principais abordagens para predição da vida em fadiga do ponto de vista mecânico são:

1. Fadiga de alto ciclo: permite rastrear a falha devido às tensões e deformações elásticas;
2. Fadiga de baixo ciclo: permite rastrear a falha devido às deformações plásticas;
3. Abordagem da mecânica da fratura: permite rastrear o período e propagação das trincas;

A primeira abordagem foi aqui utilizada, visto que o virabrequim está sujeito

a altos ciclos de esforços que induzem tensões e deformações elásticas.

Essa abordagem demanda o uso de curvas empíricas conhecidas como S-N (Tensão x Número de Ciclos) ou Wöhler. Esta correlaciona o número de ciclos que o componente suporta até sua falha por fadiga para um determinado valor de tensão. As curvas S-N utilizadas neste trabalho estão ilustradas na Figura 2.

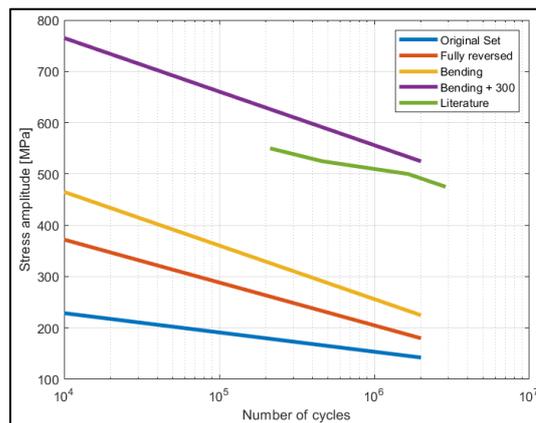


Figura 2 – Curvas S-N utilizadas – fonte: autoria própria.

Entretanto, são raras as aplicações que expõem o componente a um único valor de amplitude de tensão. É necessário, então, aplicar uma teoria de dano cumulativo para estimar a vida em fadiga de componentes sujeitos a distintos valores de carregamento.

A lei de dano cumulativo de *Palmgren-Miner* é amplamente utilizada. Para cada um dos k valores de tensão i acumula a razão do número de ciclos aplicados n_i pelo número de ciclos suportados N_i . De forma que a soma de todas as contribuições resulte em uma unidade, ou seja, e

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1$$

Equação 1 – Lei de Palmgren-Miner

A fim de considerar os efeitos da tensão média presente nos experimentos, foi utilizada a relação de Goodman, abordagem

conservadora e vastamente utilizada para projeto de componentes dúcteis (NORTON, 2013).

Buscando maior acurácia dos resultados, as propriedades do ferro fundido utilizadas no *Ansys Mechanical* foram obtidas de amostras produzidas do material do virabrequim (MORAES, 2017). Os valores estão dados na Tabela 1, sendo E - módulo de elasticidade, σ_Y - tensão de escoamento, σ_U - tensão de ruptura ν - coeficiente de Poisson.

Tabela 1 - Propriedades do Ferro Fundido - fonte: MORAES, 2017

E [GPa]	σ_Y [MPa]	σ_U [MPa]	ν [-]
177,67	400,00	708,11	0,275

O modelo de elementos finitos foi construído de tal forma a reproduzir as condições do ensaio experimental. A Figura 3 ilustra o modelo para o caso do ensaio de fadiga de flexão.

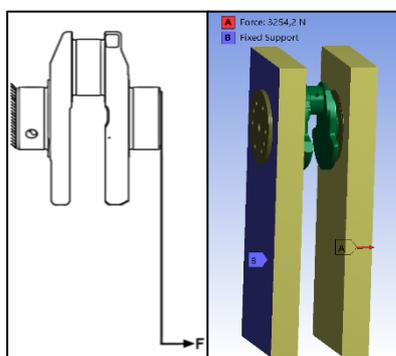


Figura 3.a (esq.) - Diagrama de Corpo Livre – fonte: MORAES, 2017. Figura 3.b (dir.) - Condições de contorno no Ansys Mechanical – fonte: autoria própria.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o fornecimento das propriedades do material, condições de contorno e geometria, inicia-se o processo de construção de malha. A malha deve ser calibrada para representar adequadamente a geometria real, mas sem acarretar um custo computacional

elevado. O gráfico a seguir mostra o comportamento da quantidade de nós na malha com a tensão máxima no componente analisado.

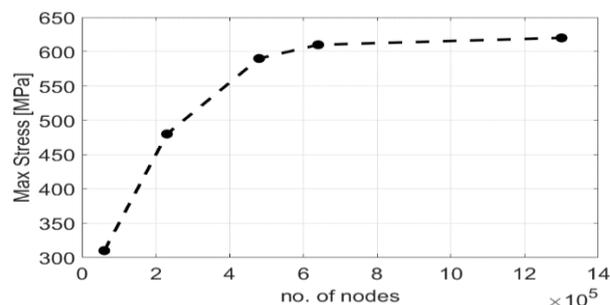


Figura 4 – Comportamento da tensão máxima para diferentes malhas – fonte: autoria própria

A malha empregada no modelo possui aproximadamente 600.000 nós. Pode-se notar na Figura 4 que o uso de uma malha mais refinada (com maior quantidade de nós) implicaria em um baixo ganho na precisão, mas com um aumento elevado do custo computacional.

Concluída a modelagem e o fornecimento dos dados, o software é capaz de realizar os cálculos numéricos utilizando a abordagem do MEF e os conceitos de fadiga.

Os primeiros resultados permitiram identificar o local de início da falha por fadiga, i.e., local da nucleação da trinca, previsto pela abordagem numérica como a maior tensão de von Mises, devido ao momento fletor aplicado, conforme apresentado na Figura 5.

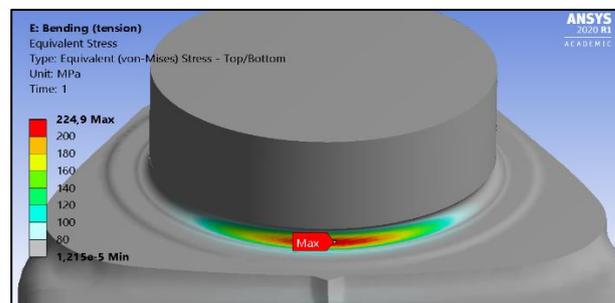


Figura 5 – Local de tensão máxima (Local de nucleação da trinca) devido ao esforço de flexão - fonte: autoria própria

Constata-se na Figura 6 que a abordagem numérica reproduziu a falha observada experimentalmente com o auxílio

do líquido penetrante em vermelho. Esta região é conhecida como filete interno.



Figura 6 – Local de início da trinca experimental devido ao esforço de flexão – fonte: MORAES, 2017

A localização da região falha permitiu avançar para a validação do comportamento elástico do modelo virtual. Para isso, é necessário desenvolver uma curva de calibração estática comparando o comportamento experimental com o numérico.

A curva é responsável por associar a tensão de von Mises em uma região determinada do componente com a magnitude de esforço aplicado. A Figura 7 ilustra as curvas de calibração estática numérica e experimental, mostrando a boa concordância entre as mesmas.

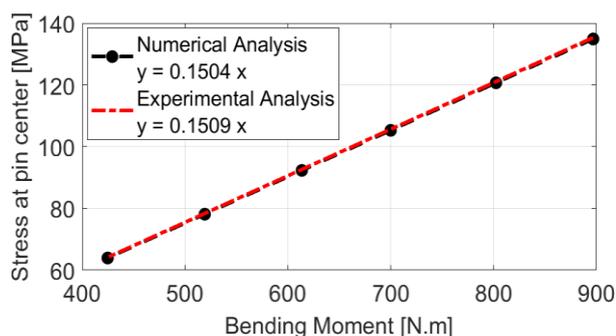


Figura 7 – Curva de calibração estática – fonte: autoria própria.

Concluída as validações dos resultados numérico e experimental, é possível obter a previsão da vida em fadiga do virabrequim. Para isso, é utilizada a ferramenta “Parameters Set” do Ansys Workbench que permite avaliar a tensão no

filete interno e a vida em fadiga para diferentes valores de força aplicada.

O momento fletor aplicado no experimento é calculado por $M = F \cdot d$, onde $d = 23,6 \text{ cm}$ é a distância do ponto de aplicação da força F e o centro do virabrequim. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para a tensão no filete do olhal menor do virabrequim para 4 valores de força.

Tabela 2 – Resultados obtidos para diferenças condições de contorno

Força aplicada [N]	Momento fletor [N.m]	Tensão no filete [MPa]	Vida [Ciclos]
900	212,4	201,2	$2,00 \cdot 10^6$
1006	237,4	224,9	$2,00 \cdot 10^6$
1007	237,7	225,1	$1,99 \cdot 10^6$
1100	259,6	245,9	$1,25 \cdot 10^6$

A partir do momento fletor de $237,4 \text{ N.m}$ tem-se a falha no virabrequim, já que a expectativa de vida desse componente é de 2 milhões de ciclos. No entanto, a abordagem numérica conta com duas limitações. A primeira é avaliar apenas a primeira etapa do processo de fadiga relacionada à nucleação da trinca. Os experimentos (MORAIS, 2017 e FERREIRA, 2020) por sua vez caracterizam a terceira etapa da falha. A segunda, é não considerar o processo de tratamento superficial de encruamento dos filetes - *deep rolling*.

Desprezar esses dois efeitos reduzem drasticamente a vida dos virabrequins. Para isso, dois fatores foram adotados, K_f e K_s , respectivamente, para a etapa de falha e o efeito do *deep rolling*.

A obtenção desses fatores é realizada ao comparar uma amostra com e sem o

tratamento superficial, avaliando assim a influência na vida em fadiga. Em (SPITERI, 2005), observou-se um aumento médio de 56% na vida entre a 1ª e a 3ª etapa de falha, obtendo-se, $K_f = 1,56$. Já em (KAMIMURA, 1985) e (PARK, 2001), observou-se aumento de 100% na vida útil após o processo de *deep rolling*. Assim, $K_s = 2,0$.

Portanto, após a consideração dos dois efeitos, o momento que induz a falha por fadiga numericamente é dado por:

$$M_{numérico} = K_f K_s M$$

O momento numérico identificado de falha foi de $740,7 N.m$, enquanto o valor experimental foi de $768,0 N.m$. O erro obtido foi de 3,5%, o que pode ser considerado muito bom.

CONCLUSÕES:

Visto que o valor encontrado de vida em fadiga do virabrequim automotivo aproxima-se dos valores encontrados experimentalmente e em demais literaturas, pode-se concluir:

- A abordagem numérica, traz resultados coerentes e próximos dos observados se modelada corretamente e com auxílio de dados experimentais que dizem respeito à realidade do componente. Entradas ruins, resultam em resultados numéricos de baixa qualidade, fenômeno conhecido como GIGO (*Garbage in, garbage out*);
- A modelagem virtual, após validação, é uma ferramenta muito poderosa na etapa de projeto dos componentes. Reduzindo gastos e prazos, fornecendo maior liberdade de otimização, além de atuar como uma ótima ferramenta qualitativa

para análise de desempenho entre designs ainda não produzidos ou prototipados;

- No atual cenário, as ferramentas e tecnologias evoluem muito rapidamente. Em um curto período, softwares podem tornar-se obsoletos. Logo, é uma área que demanda muita proatividade e busca por novos conhecimentos.

BIBLIOGRAFIA

- T.L. Anderson. **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications**. Boca Raton, CRC Press, 2017.
- R.W. Herzberg et al. **Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials**. Danvers, Wiley, 2012.
- R.L. Norton. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**, 4. ed. Porto Alegre, Bookman, 2013.
- E.A.B. de Moraes, **Análise Numérica e Experimental de Fadiga de Virabrequins**. Dissertação de Mestrado, FEM/UNICAMP, 2017.
- R. N. Ferreira, **Análise Experimental de Fadiga de Virabrequins Leves e Montados**. Dissertação de Mestrado, FEM/UNICAMP, 2020.
- S. G. Villalva et al. **Correlation between CAE and experimental fatigue bench tests for automotive crankshafts**. SAE Technical Paper, 2010.
- I. M. Quraishi et al. **Fatigue Strength and Residual Stress Analysis of Deep Rolled Crankshafts**. International Journal of Engineering and Technology (IJET), v. 4, n. 6, p. 466-473, 2013.
- ANSYS, Inc. **ANSYS Mechanical 2020R1 User's guide**, 2020.