Análise da propagação de trincas por fadiga em mancais de rolamento

Palavras-Chave: vida em fadiga-1, mancais de rolamento-2, fadiga de superfície-3

Autores(as):
Mateus Weissenrieder Dias, FEM – UNICAMP
Prof(ª). Dr(ª). Katia Lucchesi Cavalca Dedini (orientadora), FEM – UNICAMP
Dra. Laís Carrer Silva (co-orientadora), FEM-UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Os mancais de rolamento desempenham uma função essencial para os eixos, possibilitando o movimento relativo destes em relação às partes fixas da máquina e reduzindo as perdas de energia por atrito, desde que devidamente lubrificados. No entanto, com altas velocidades de rotação dos elementos rolantes, seja por rolamento puro ou com leve deslizamento, em contato tanto com o anel externo quanto com o interno, o desgaste do material torna-se significativo, resultando, por consequência, em ruídos e aumento de temperatura, o que reduz a eficiência do mecanismo e pode até levar à falha do rolamento, na qual pode gerar prejuízos financeiros e até mesmo falhas catastróficas.

Desta maneira, o estudo de falhas por fadiga em mancais de rolamento é essencial para assegurar o funcionamento eficaz e seguro de máquinas e dispositivos. Essa investigação auxilia na detecção de falhas iniciais, evitando interrupções inesperadas, aprimorando a manutenção e prolongando a durabilidade dos equipamentos. Ademais, possibilita a adoção de ações corretivas para prevenir danos mais severos, diminuindo despesas com consertos e elevando a confiabilidade do sistema.

O modelo, primeiramente é de previsão do número de ciclos em vida útil até falha em fadiga superficial, chamada de vida L10, com carregamentos apenas puramente radiais com base no contato entre as esferas e as pistas, conforme abordados na teoria de contato seco de Hertz, analisando separadamente cada contato superficial presente num rolamento. Por sua vez, a segunda etapa é a propagação da trinca gerada pelo primeiro estágio, que é modelada por uma lei de Paris modificada para o contato específico presente no mancal, com critério estabelecidos de começo e final de trinca, e por último é passado do domínio de ciclos para o domínio temporal, onde se obtém a vida final em horas de um mancal.

METODOLOGIA:

Para aplicar todo o cálculo das tensões para obter a vida em fadiga das pistas, é necessário fazer a análise do momento na qual o elemento esférico do mancal que está sobre maiores condições de carregamento, na qual terá os primeiros indícios de falha, que é o elemento com angulo azimute nulo,

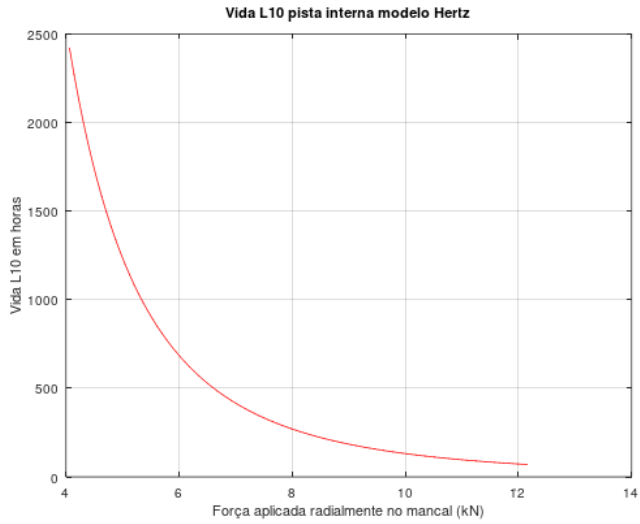
que é o elemento rolante central [HARRIS, 1986]. Onde é possível calcular a força de compressão do elemento sob condições máximas de carga.

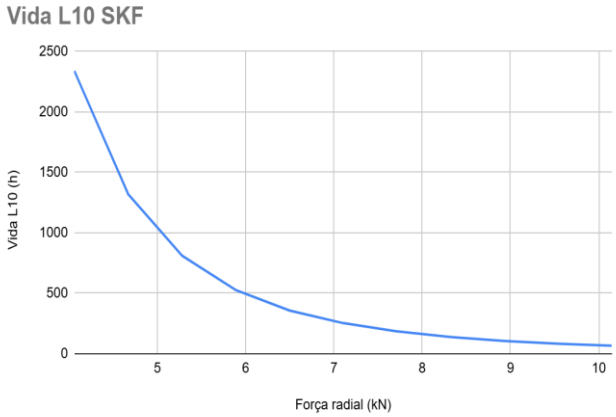
Neste trabalho foi dividido as duas regiões de contato presentes nas esferas, esfera-pista interna e esfera-pista externa onde ambas as regiões são caracterizadas como contato geral, pois quando a geometria de dois corpos em contato tem formas curvas diferentes, a região de contato é elíptica e a distribuição de pressões é um semielipsoide [NORTON, 2006]. Uma vez que com as constantes de materiais, geometria das pistas e das esferas e a força de contato é possível obter as dimensões das elipses, consequentemente a pressão máxima de compressão no contato. Por final, é necessário obter as tensões de cisalhamento nas quais são as que regem a vida L10 das pistas do mancal por meio das curvas de regressão linear de vida para o material adequado utilizado, o aço 52100 (Romanowicz e Szybinski, 20190).

A metodologia adotada neste trabalho parte da aplicação da Lei de Paris modificada para a modelagem da propagação de trincas em mancais com elementos rolantes. Reconhecendo que o comportamento da trinca é preferencialmente crescente no sentido transversal ao rolamento ao longo do tempo apresenta dois estágios distintos, considera-se que apenas o segundo estágio é adequadamente descrito pela Lei de Paris, uma vez que o primeiro estágio é fortemente influenciado por mecanismos microestruturais, não sendo possível seu equacionamento. Devido à complexidade de definir o fator de intensidade de tensão em um campo multiaxial de tensões, com componentes de compressão e cisalhamento, optou-se por uma simplificação, adotando como base para o cálculo apenas a tensão de contato máxima. Desta maneira, por meio de um trabalho experimental (International Journal of Fatigue) foi possível obter as constantes que regem a lei de Paris modificada e simplificado para o caso abordado.

Na modelagem, dois parâmetros fundamentais foram definidos para viabilizar a integração da Lei de Paris: o tamanho inicial da trinca e o critério de parada. O valor do tamanho inicial da trinca foi determinado com base em no fator intensidade tensão limite para aço 52100 (Rycerz), na qual representa o menor fator de intensidade de tensão do material para que se inicia-se uma trinca. Já o critério de parada da trinca foi inicialmente estabelecido como o próprio limite da elipsidade, ou seja, considera-se que a trinca para de ser válida dentro do modelo quando seu comprimento atinge os valores dos semieixos da elipse formada pela tensão de contato, pois após este limite o comportamento da trinca não é regido pelo tipo raiz forma da Lei de Paris.

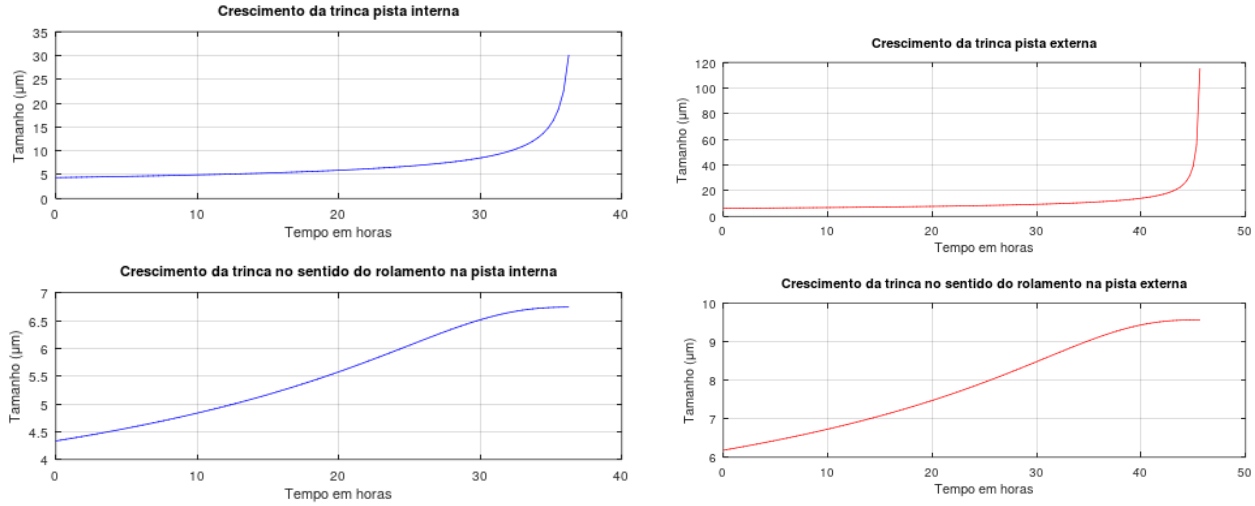
Por fim, a propagação da trinca no sentido do rolamento, que corresponde ao caminho ortogonal ao preferencial identificado em estudos experimentais devido à direção dominante do cisalhamento cíclico. Para isso, utilizou-se um fator de correção geométrica apropriado para trincas elípticas com esse alinhamento (Dowling). A integração numérica da Lei de Paris foi realizada no domínio de ciclos, mas para correlacionar os resultados à vida útil do componente, esse domínio foi convertido para o domínio temporal (em horas), por meio das frequências de passagem dos elementos rolantes sobre a pista, utilizando os parâmetros BPFO (Ball Pass Frequency Outer Race) e BPFI (Ball Pass Frequency Inner Race), que representam a taxa de ciclos de carregamento para a pista externa e interna, respectivamente. Com isso, obteve-se uma estimativa da vida útil em função da velocidade de rotação e da geometria do rolamento, permitindo a comparação com modelos clássicos e dados experimentais.





Figuras 1 e 2- Gráfico vida em fadiga em horas (L10) pelo modelo Hertz (vermelho) e por catálogo SKF (azul) por força em kN aplicada radialmente para mancal 6206

No entanto, para os resultados da propagação da trinca regida pelo modelo de Lei de Paris, foi utilizado como exemplo o mesmo mancal dado anteriormente, mas agora com a força puramente radial constante de 1kN para visualizar o crescimento da trinca nas pistas internas e externas em ambos os sentidos e devidamente passadas para o domínio do tempo.



Figuras 2 e 3- Gráficos tamanho da trinca em micrometros pelo modelo Lei de Paris por tempo em horas para mancal 6206

CONCLUSÕES:

Durante a propagação da trinca, observou-se que seu crescimento é mais rápido e seu tamanho final é maior no sentido transversal ao movimento dos corpos rolantes. Essa direção

concentra os maiores gradientes de cisalhamento devido ao efeito combinado da pressão de contato resultante da extensão do contato devido à osculação da pista, o que resulta em maior intensidade de tensões na perpendicular ao deslocamento. Por outro lado, no sentido do rolamento (longitudinal), onde os elementos rolantes aplicam esforços mais suavemente distribuídos ao longo do tempo, a trinca apresenta crescimento mais lento e limitado. Essa anisotropia no crescimento é confirmada por estudos experimentais que apontam a formação de trincas tipo “V marks” no sentido do rolamento e trincas predominantes e mais críticas no sentido transversal.

A vida completa das pistas pode ser dividida em três estágios distintos. O primeiro estágio, correspondente à vida nominal L10, representa a iniciação da trinca superficial por fadiga de contato (pitting), e é previsto pelas equações de vida clássicas (como as da SKF e de Hertz). O segundo estágio refere-se à propagação da trinca, regida pela Lei de Paris modificada, sendo responsável por uma fração menor da vida total, mas crítica por levar à falha progressiva (processo conhecido como spalling). Por fim, o terceiro estágio representa a instabilidade final da trinca, levando à fratura catastrófica do material. Nesse ponto, a falha deixa de ser superficial e passa a comprometer a integridade estrutural do componente, caracterizando a ruptura irreversível da pista do mancal.

Apesar do modelo desenvolvido neste trabalho não considerar os efeitos da lubrificação, os resultados se mostraram coerentes com os dados experimentais e com modelos validados, inclusive nas estimativas em domínio temporal por meio das frequências BPFO e BPFI. Futuramente, pretende-se aprofundar o estudo com a inclusão de um modelo de lubrificação elastohidrodinâmica (EHD), que permitirá representar de forma mais precisa os efeitos de separação entre as superfícies de contato, bem como a pressão hidráulica interna exercida sobre a trinca. A comparação entre os resultados obtidos com contato seco e com EHD poderá indicar a importância do regime de lubrificação na vida útil dos rolamentos, possibilitando avanços em modelos de previsão de falha mais realistas e abrangentes.

BIBLIOGRAFIA

Bhadeshia, H.: Steels for bearings. Progress in materials Science 57(2), 268–435 (2012)

Harris, T.A., Crecelius, W.: Rolling bearing analysis (1986)

Norton, R.: Machine Design: An Integrated Approach. Pearson Prentice Hall (2006)

Rycerz, P., Olver, A., Kadiric, A.: Propagation of surface initiated rolling contact fatigue cracks in bearing steel. International Journal of Fatigue 97, 29–38 (2017)

Catalogue of Rolling Bearings SKF. Rolamentos de esferas. Disponível em: https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings. Acesso em: 28 jan. 2025.