

“Calculo da espessura de filme fluido e distribuição de pressão em contatos lubrificadas elastohidrodinamicamente sob cargas elevadas.”

BATISTA NETO, J.A¹, RICCI, MARIO CESAR²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Aluno de Doutorado do curso de Ciência e Tecnologia Espacial e Controle - DMC

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

Resumo. Neste trabalho se propõe avaliar através de técnicas de calculo numérico, o perfil das deformações elásticas, das pressões e das espessuras de filme lubrificante, ponto a ponto, entre as superfícies em contato sob elevada carga e com lubrificação elastohidrodinâmica. Utiliza como ferramenta fundamental os programas desenvolvidos com Matlab para os cálculos, gráficos e simulações, com um embasamento teórico fornecido por Lagrange (polinomial de três pontos com malha geral), Hertz e Newton-Raphson (método iterativo). Como resultados espera-se demonstrar pressões para o filme de óleo da ordem de 3.0 a 4.5 GPa.

Palavras-chave: Tribologia; Deformação Elástica; Filme Fluido; Fator de Influência.

1. Introdução

Veículos espaciais, independentemente de tamanho, tipo ou missão, usualmente contém um grande numero de sistemas de mecanismos moveis cuja performance contínua deve garantir que certas funções essenciais para o sucesso da missão sejam mantidas. A maioria dos problemas encontrados com estes sistemas móveis pertence à tribologia, um campo da lubrificação, que hoje se conecta diretamente à performance confiável dos mecanismos, elementos fundamentais para o sucesso da missão. Dificuldades apresentadas em ambiente de alto vácuo, gravidade próxima de zero e restrição de peso têm sido reportadas nas varias ocorrências de missões que falharam pela deficiência proveniente de mal funcionamento de sistemas moveis com rolamentos. Ao contrario de ontem, hoje as missões espaciais têm sido planejadas para 30 anos ou mais, o que torna a tribologia uma disciplina que requer maior atenção nos projetos.

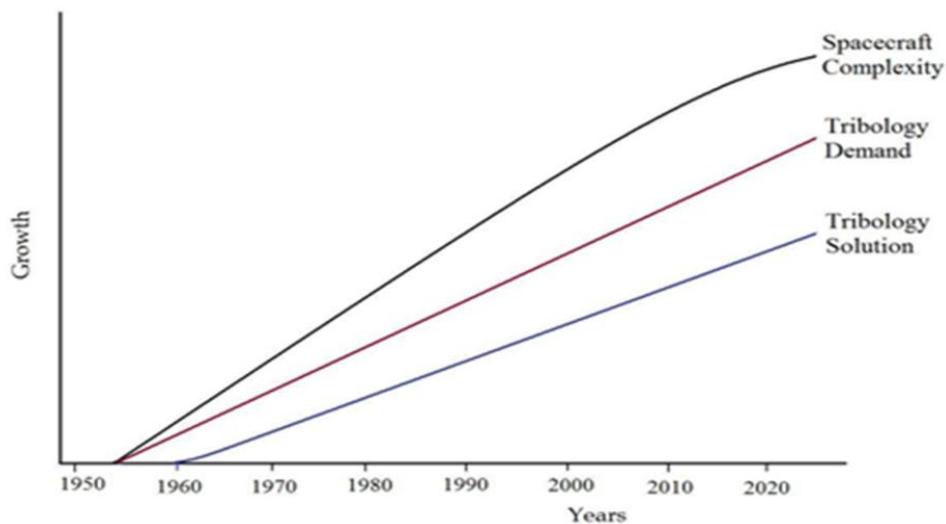


Figura 1- Curva temporal da evolução Complexidade - Demanda e Soluções

Estes cálculos fornecerão subsídios claros e precisos aos projetistas e pesquisadores futuros, que deverão desenvolver lubrificantes sintéticos favoráveis à missão requerida.

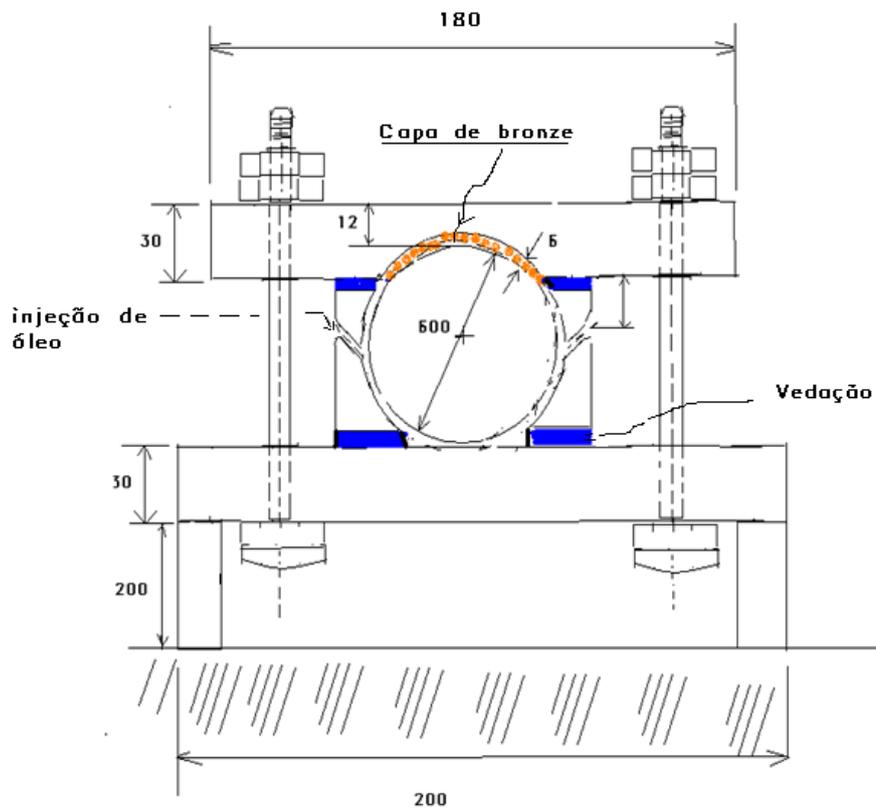
È importante frisar que, por unanimidade dos próprios autores, a convergência a ser encontrada durante os cálculos, principalmente ao utilizar os algoritmos de Newton-Raphson é difícil de ser atingida, exigindo dedicação intensa e exclusiva.

2. Metodologia

A proposta deste trabalho será o desenvolvimento de um cálculo aproximado, via método numérico, para as espessuras de filme lubrificante, pressões e deformações elásticas em contatos lubrificadas elastohidrodinamicamente.

Utilizaremos uma versão melhorada da abordagem de Okamura sobre este assunto, seguindo, para um modelo físico aqui proposto, as aplicações de Hamrock e Tripp's. A aproximação proposta prevê para a compressibilidade do lubrificante, a utilização da viscosidade de Roelands, uma malha de step não constante e um cálculo aproximado das deformações elásticas desenvolvidas devido às cargas elevadas. Na sequência analisaremos os efeitos dos resultados sobre a espessura de filme e picos de pressão, que também serão calculadas pelos métodos numéricos descritos nos trabalhos de Hamrock, Tripps e Okamura.

De uma forma ilustrativa, teremos:



Escala : 1:50
L = 1000 mm
L (Desenho) = 200 mm
R = 300 mm
R (desenho) = 60 mm
(5 vezes menor)

Figura 2 - modelo físico – rolo sobre placa plana deslizando sem atrito

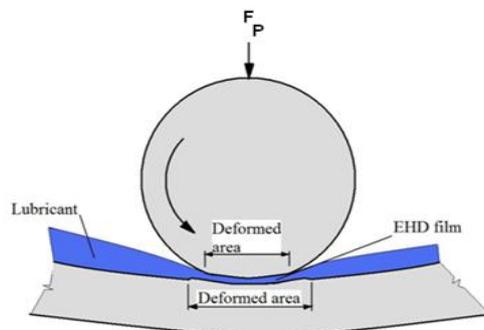


Figura 3 - esquema para rolo em operação

A deformação elástica nas peças sólidas é dada pela equação,

$$\delta = - \frac{2}{\pi E'} \int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} p \ln(x - x')^2 dx' \quad (1)$$

Aqui a deformação varia com a posição x , das superfícies em contato, enquanto a pressão varia com x' , que é a projeção da curva de pressão na linha x (direção do rolamento).

Esta equação (1), após adimensionalização, evoluirá para :

$$\bar{\delta} = - \frac{1}{2\pi} \int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} \frac{dP}{dX'} (X - X') [\ln(X - X')^2 - 2] dX' - \frac{1}{4} \ln\left(R^2 \frac{8W}{\pi}\right) \quad (2)$$

Onde:

R é o raio adimensional do rolo e W é a carga adimensional aplicada.

A deformação média e adimensional entre as duas superfícies é dada por:

$$\bar{\delta} = R\delta/b^2 \quad (3)$$

Onde b (em metros) é o comprimento médio hertziano.

Definidos os eixos coordenados e as hipóteses, faz-se a aproximação da equação $P(x)$ desconhecida para uma função (*Método da interpolação polinomial por diferença-dividida de Newton*), $f(x)$ contínua e diferenciável no intervalo $[a,b]$.

O teorema de aproximação de Weinstrass justificará a aproximação da função $P(X)$, onde:

$$P_n(X_i) = f(X_i) \quad i = 0,1,2, 3, 4,5,\dots,n$$

$f(X)$ - é a desconhecida função da Pressão variando com pontos X das superfícies em contato. Para nosso modelo de rolo deslizando sem atrito sobre uma placa plana, sabe-se que é de grau $n = 2$.

A teoria de Hertz nos fornece parâmetros teóricos dedutíveis analiticamente que nos auxiliam a ter um ponto de partida para os cálculos. Tais parâmetros já estão embutidos na equação (2)

$$X=x/b \quad \text{adimensional} \quad - \text{direção do movimento} \quad (4)$$

$$b = R \sqrt{8W/\pi} \quad [\text{m}] \quad - \text{meio comprimento Hertziano} \quad (5)$$

$$P = p/p_H \quad \text{adimensional} \quad - \text{pressão produzida pela carga exterior} \quad (6)$$

$$p_H = \frac{E'b}{4R} = E' \sqrt{\frac{W}{2\pi}} \quad [\text{Pa}] \quad (7)$$

$$\bar{\delta} = \frac{R\delta}{b^2} \quad (8)$$

$$W = w/E'R \quad (9)$$

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left(\frac{1-\nu^2}{E_a} + \frac{1-\nu^2}{E_b} \right) \quad [\text{Pa}] \quad (10)$$

Na sequência dividiremos o comprimento de cálculo (largura do rolo) em malhas, a escolher o numero de nós (no mínimo 50 nós) e determinaremos os valores para Xend e N, que será o numero de nós.

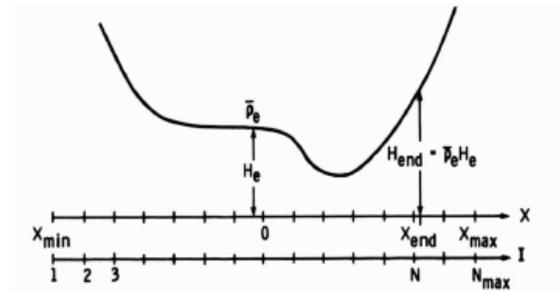


Figura 4- Esquema demonstrativo para o calculo de Xend e de N

Utilizaremos as pressões de P(X) adimensionais determinadas para a curva aproximada, e aplicamos nas equações abaixo.

$$P = \frac{X'(X' + X_j - X_{j+1})}{(X_{j-1} - X_j)(X_{j-1} - X_{j+1})} P_{j-1} + \frac{(X' + X_j - X_{j-1})(X' + X_j - X_{j+1})}{(X_j - X_{j-1})(X_j - X_{j+1})} P_j + \frac{(X' + X_j - X_{j-1}) X'}{(X_{j+1} - X_{j-1})(X_{j+1} - X_j)} P_{j+1} \quad (11)$$

$$\delta_i = \sum_{j=1}^N D_{ij} P_j - \frac{1}{4} \ln \left(R^2 \frac{\partial W}{\partial x} \right) \quad (12)$$

$$\left(\frac{dP}{dX} \right)_i = a_{i,i-1} P_{i-1} + a_{i,i} P_i + a_{i,i+1} P_{i+1} \quad (13)$$

$$\Delta H = \frac{X^2}{2} + \delta - \delta_{\max} \quad (14)$$

A equação (12) nos fornecerá a deformação para o nó "i", sendo P_j a pressão na iteração "n" calculada em (11) e de influência "j" para o nó "i". D_{ij} são os fatores de influencia (pesos) aplicados em (12). A equação (13) nos fornecerá a variação dP/dX ao longo do contato, ponto a ponto. Conhecidas as deformações elasticas ao longo do contato, através da equação (14) podemos encontrar a espessura de filme ponto a ponto ao longo do contato.

3. Resultados e Discussão

Os resultados do item 2 devem ser tabelados e compilados para formar os algoritmos da matriz de Newton-Raphson, cuja convergência é de difícil concepção, porém necessária para garantir os resultados.

Os resultados com o emprego destas técnicas estão demonstrados nas duas curvas abaixo. A maioria destes resultados foram obtidos utilizando formulador de dois nós ao invés de três como estamos tentando aplicar a nosso modelo. O motivo é a dificuldade encontrada pelos autores na convergência dos resultados. Sugerem iterações da ordem de 14 a 15 vezes, iniciando pelo perfil prévio de pressão e com os valores da pressão Hertziana na iteração zero, até a ultima iteração, que será a convergida e solução do problema.

A formulação feita com três nós, mostrou que a convergência para dP/dX foi mais difícil de encontrar, porém foi necessário muito menor numero de nós. O pico de pressão P_s próximo a X_{end} , deverá oscilar com pouca ou muita intensidade, dependendo do valor de N_{Max} (numero maximo de nós. Note na figura 4 que temos N_{max} e N como variáveis). Assim, no final é necessário revisão e alteração no valor de N_{max} .

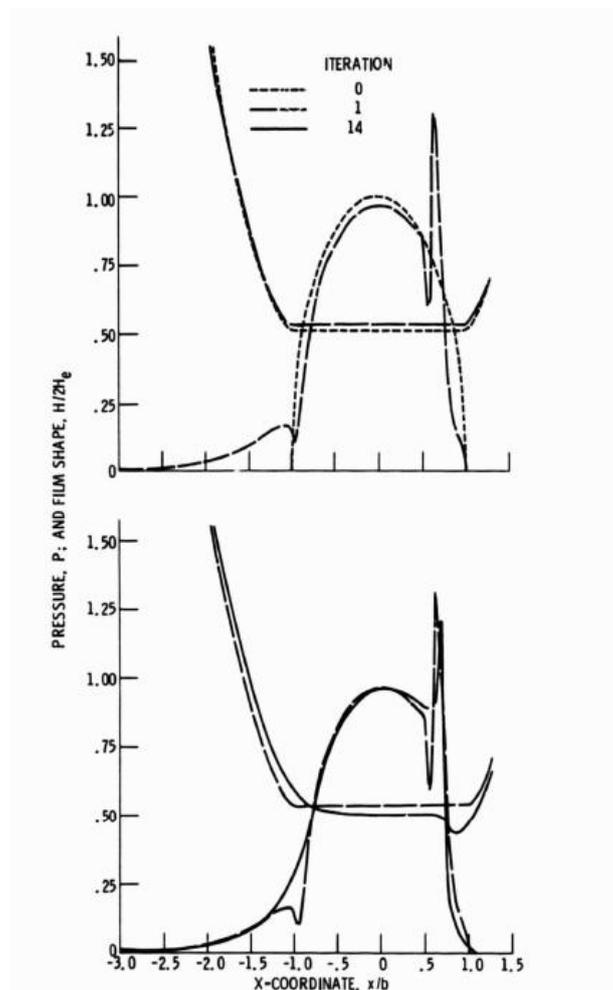


Figura 5- Curva de pressão e espessura de filme de óleo nas iterações 0; 1 e 14

4. Conclusão

Os resultados demonstrados foram baseados em pressão de Barus, onde a pressão do óleo lubrificante varia exponencialmente com a viscosidade. Nossos resultados certamente serão outros números, porém as curvas deverão ter o mesmo aspecto. Com certeza serão enfrentadas dificuldades com as convergências, mas com a mesma certeza os objetivos em chegar a números condizentes e disponíveis para os futuros pesquisadores serão utilizados, por serem indispensáveis à determinação de lubrificantes adequados a resistirem cargas elevadas sem o rompimento do filme, fato marcante para o início da degradação dos mecanismos.

Referências

Okamura, H., “A Contribution to the Numerical Analysis of Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication.” Tribology of Reciprocating Engines: Proceedings of the 9th Leeds-Lyon Symposium on Tribology. Butterworths, Guilford, England, 1982, pp. 313-320.

Houpert, Luc G. and Hamrock J. Bernard (1985) “Fast Approach for Calculating Film Thicknesses and Pressures in Elastohydrodynamically Lubricated Contacts at High Loads”, In: Lewis Research Center, Cleveland, Ohio. NASA Technical Memorandum 87032.

Carnahan, Brice and Luther, A.H., and Wilkers, O. James, “Applied Numerical Methods” Edited by John Wiley & Sons, INC., New York, London, Sydney, Toronto. (1991)