

### Introdução



Com a necessidade da diminuição do tempo de projeto, a utilização de modelos computacionais para simulação de componentes mecânicos constitui fase fundamental do projeto de máquinas, avaliando parâmetros e minimizando testes físicos em protótipos. Assim, o presente trabalho baseia-se no estudo da dinâmica de mancais de elementos rolantes e na modelagem computacional que permite conhecer sua influência sobre o sistema completo.

Foram desenvolvidas rotinas em Fortran 90 que caracterizam os contatos para um determinado mancal, com suas propriedades e carregamentos, e foram comparados dois métodos de solução para as equações não lineares envolvidas, o método de Newton-Raphson e o de Levenberg-Marquardt (L.M). Na sequência, foi criada uma interface gráfica que reúne ambas as rotinas e facilita o uso dos códigos computacionais.

### Metodologia

Para o desenvolvimento do projeto, o mancal foi modelado com dois graus de liberdade, conforme a figura 1, na qual temos a aplicação de uma força a um determinado ângulo  $\theta$ , e utilizou-se este modelo para caracterizar dinamicamente o contato. Aplicou-se a teoria Elastohidrodinâmica e o filme de óleo foi aproximado por um conjunto de molas e amortecedores não lineares, como representado na figura 2.

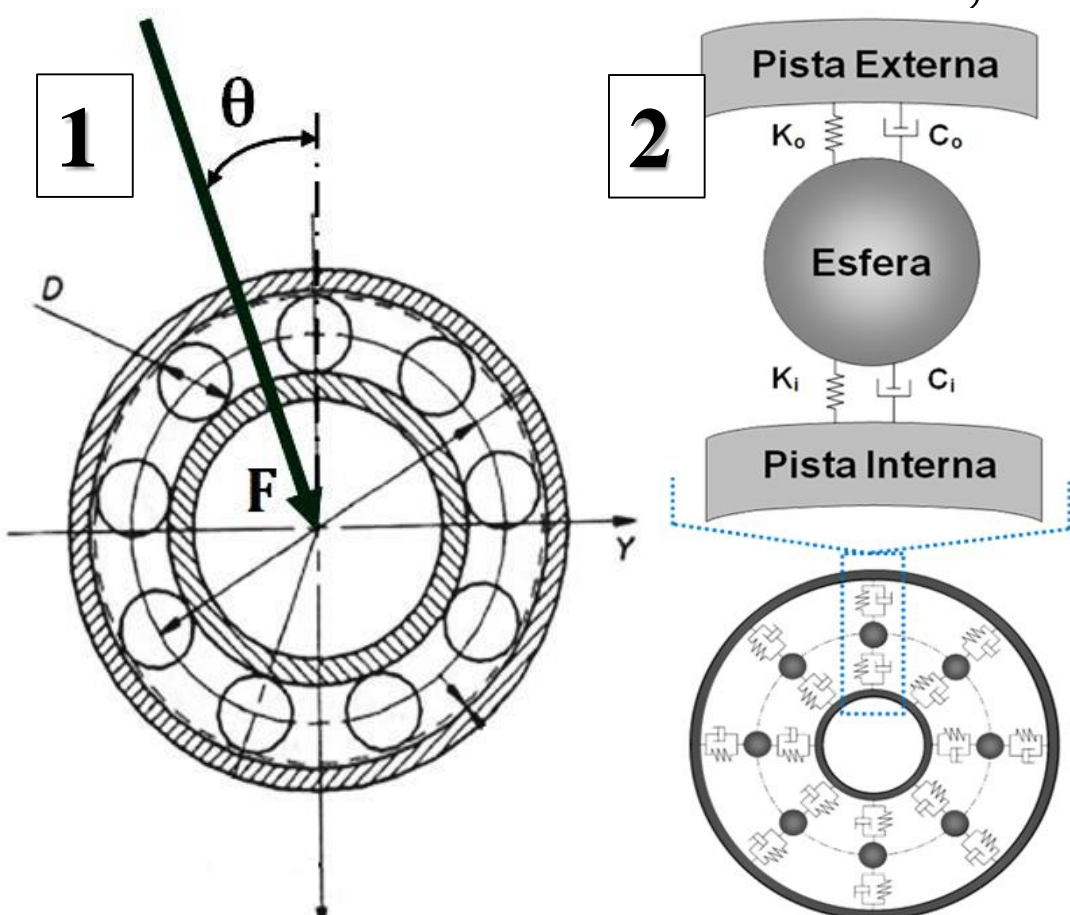


Figura 1 – Modelagem do mancal de esferas

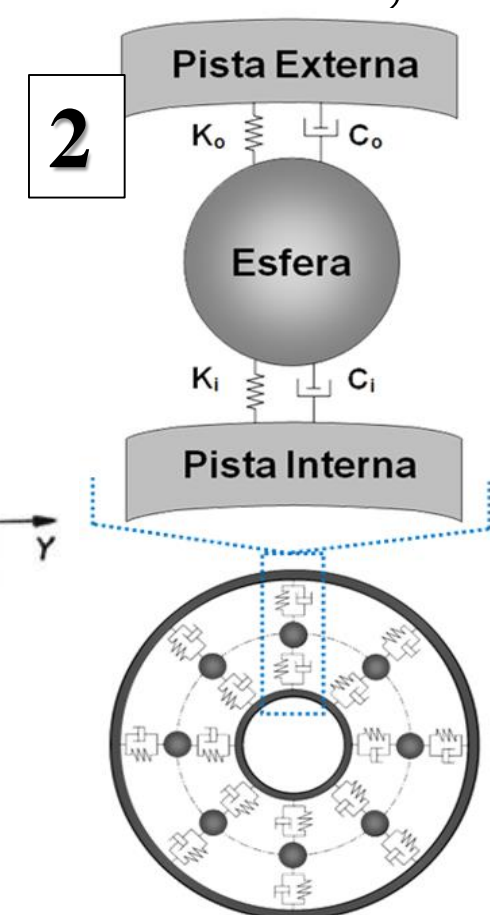


Figura 2 – Aproximação do filme de óleo por molas e amortecedores não lineares

Na fase inicial, foi usado um conjunto de dados para a força ( $F$ ) e para os deslocamentos ( $\delta$ ) para a pista interna e externa para dois mancais conhecidos, possibilitando então, encontrar parâmetros  $K$ ,  $d$  e  $\Delta F$ , que modelam a força não linear (equação 1). Em seguida, calculou-se o equilíbrio estático do mancal (equações 2) que permitiu encontrar os deslocamentos em  $x$  e  $y$  ( $\delta_x$  e  $\delta_y$ ) para cada uma das esferas ( $Z$  esferas).

Com os deslocamentos, utilizou-se o método das perturbações para aproximar o valor das forças dinâmicas ( $F_x^*$  e  $F_y^*$ ) em  $x$  e  $y$  (equações 3) e assim pôde-se calcular a distribuição de forças resultantes em cada uma das esferas.

$$F_{i,0} = K\delta^d + \Delta F \quad (1)$$

$$f_x = \sum_{j=1}^Z \tilde{F}(\delta_x \cos(\psi_j) + \delta_y \sin(\psi_j)) \cos(\psi_j) - Fr \cos(\theta) = 0 \quad (2)$$

$$f_y = \sum_{j=1}^Z \tilde{F}(\delta_x \cos(\psi_j) + \delta_y \sin(\psi_j)) \sin(\psi_j) - Fr \sin(\theta) = 0$$

$$f_x^* = f_x + \sum_{j=1}^Z C_j * (\delta_x \cos(\psi_j) + \delta_y \sin(\psi_j) + \omega_c(\delta_y \cos(\psi_j) - \delta_x \sin(\psi_j))) \cos(\psi_j) \quad (3)$$

$$f_y^* = f_y + \sum_{j=1}^Z C_j * (\delta_x \cos(\psi_j) + \delta_y \sin(\psi_j) + \omega_c(\delta_y \cos(\psi_j) - \delta_x \sin(\psi_j))) \sin(\psi_j)$$

Durante a implementação, foram aplicados os métodos de Newton Raphson e de L.M. que apresentaram diferentes convergências, e foram usadas diversas estimativas iniciais, para analisar a flexibilidade do método e sua convergência com tal variação. Foi desenvolvida também, uma interface gráfica em Visual Basic que permite ao usuário caracterizar um mancal fornecendo dados de sua geometria e informações de operação.

### Resultados e discussões

A tabela 1 apresenta os valores obtidos para  $K$ ,  $d$  e  $\Delta F$ , mostrando a convergência para o Método de Newton Raphson, enquanto que, a tabela 2 mostra para os mesmos valores iniciais, os resultados convergidos pelo método de L.M. (considerando os valores nominais dos parâmetros como:  $K=9,55 \times 10^9$ ,  $d=1,44$  e  $\Delta F=0,99$ ). Outro resultado obtido é o gráfico que mostra a variação das forças de contato dinâmicas, com a posição angular da esfera, conforme mostra a figura 3.

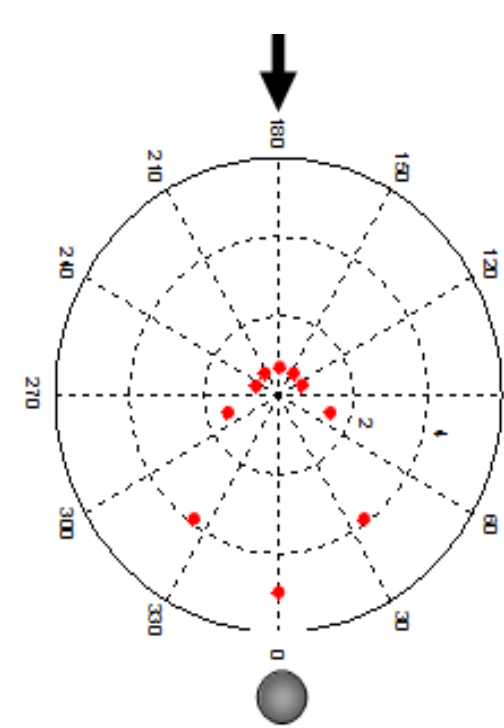
Tabela 1 – Valores iniciais e resultados das simulações por Newton Raphson

Estimativa inicial			Valores obtidos		
K	d	$\Delta F$	K	d	$\Delta F$
$9 \times 10^9$	1,4	1	$9,551 \times 10^9$	1,432	0,995
$8,5 \times 10^9$	1	0,5	Não converge		
$9,5 \times 10^9$	1,5	1	$9,490 \times 10^9$	1,432	1,136
$9 \times 10^9$	1,5	1,5	$9,440 \times 10^9$	1,433	1,291
$5 \times 10^9$	0,5	0,5	Não converge		
$9,5 \times 10^9$	2	1,5	Não converge		

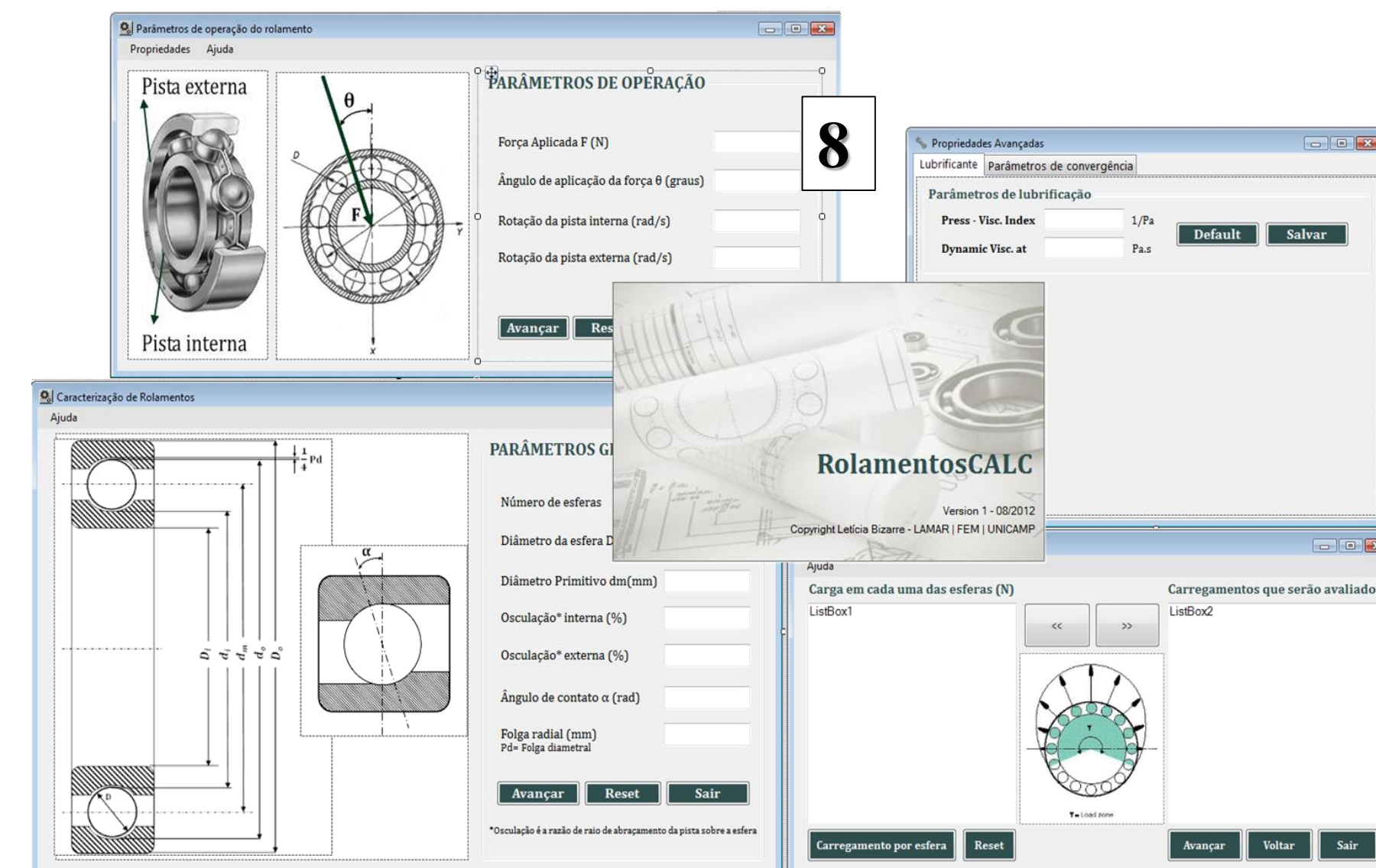
Tabela 2 – Valores de chutes iniciais e resultados das simulações por Levenberg-Marquardt

Estimativa inicial			Valores obtidos		
K	d	$\Delta F$	K	d	$\Delta F$
$9 \times 10^9$	1,4	1	$9,551 \times 10^9$	1,432	0,995
$8,5 \times 10^9$	1	0,5	$9,551 \times 10^9$	1,432	0,995
$9,5 \times 10^9$	1,5	1	$9,551 \times 10^9$	1,432	0,995
$9 \times 10^9$	1,5	1,5	$9,551 \times 10^9$	1,432	0,995
$5 \times 10^9$	0,5	0,5	$9,551 \times 10^9$	1,432	0,995
$9,5 \times 10^9$	2	1,5	$9,551 \times 10^9$	1,432	0,995

3 Gráfico para a força inicial aplicada em  $0^\circ$  com mancal de 10 esferas



A esfera no gráfico representa a esfera com maior carregamento e a seta mostra a posição de aplicação da força.



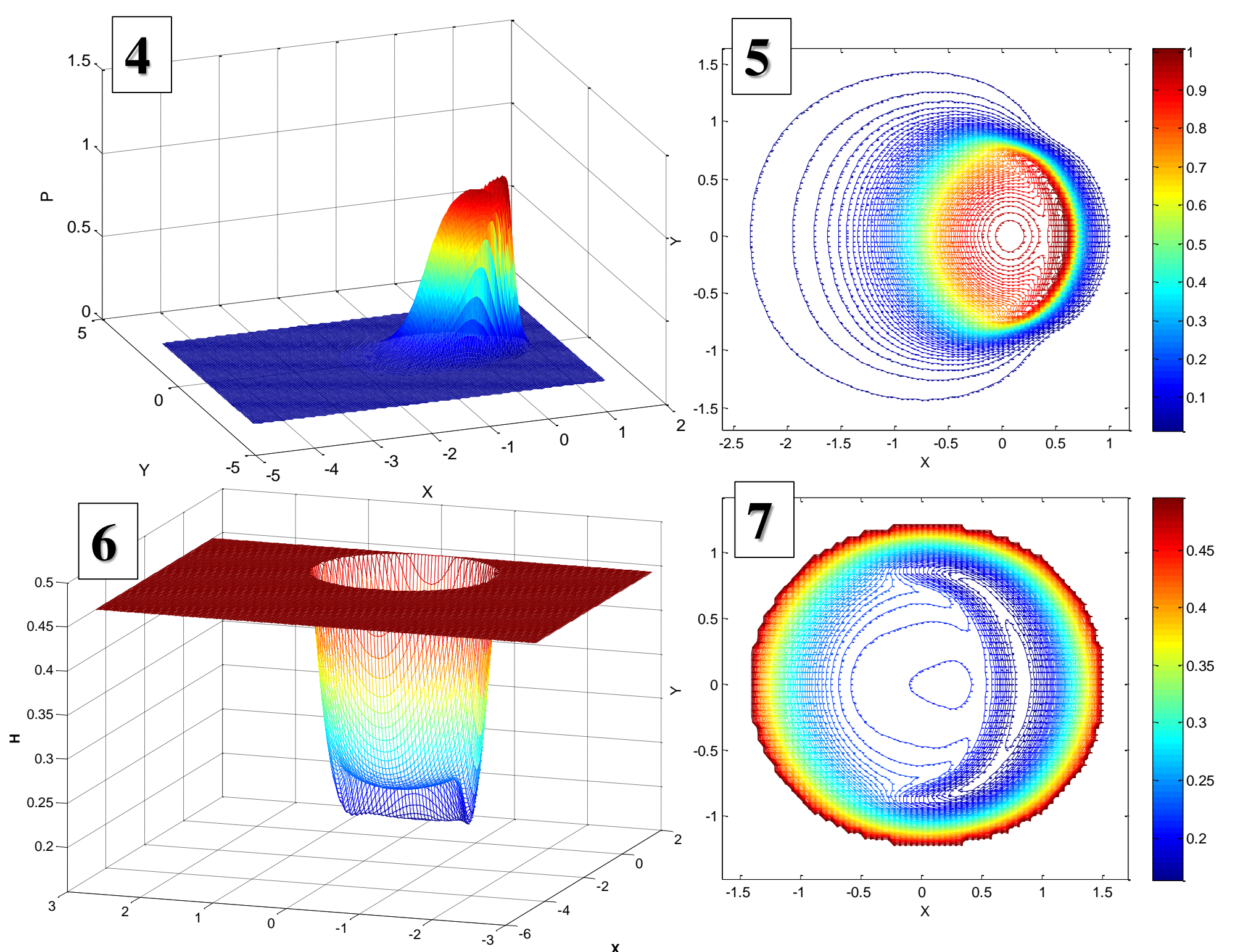
### Conclusões

Observando o resultado obtidos para os coeficientes, percebe-se que o método de L.M se mostrou mais robusto para a convergência dos resultados, permitindo maiores variações de valores iniciais e, ainda assim, convergindo para valores próximos aos nominais. Percebe-se também, dos resultados, que as esferas mais carregadas estão na direção oposta a aplicação da força, assim como verifica-se o comportamento da distribuição da carga nessas esferas, considerando a lubrificação Elastohidrodinâmica.

O programa desenvolvido permite a caracterização do filme de lubrificante e os cálculos das distribuições de forças, assim como a possibilidade de caracterizar parâmetros físicos do mancal, como as rigidezes das pistas interna e externa, e a interface criada facilita a utilização dos programas computacionais.

### Referências Bibliográficas

- NONATO, F. “Modelo dinâmico para o contato em mancais de elementos rolantes sujeito a lubrificação elastohidrodinâmica”. 2009. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas.
- RADAELLI, G. Z. “Determinação do Carregamento Dinâmico em Mancais de Esfera de Contato Angular”. 2012. Dissertação (Trabalho de Graduação) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.



Um resultado também obtido da caracterização do mancal, usando o método multi-níveis para resolver a lubrificação EHD, são os gráficos de pressão e espessura de filme no contato, que permitem observar o comportamento dos mesmos. É possível caracterizar cada um dos contatos das esferas com as pistas interna e externa, e no caso em estudo, é possível observar o pico de Petruschev no gráfico de pressão. As figuras 4 e 5 mostram os gráficos para pressão, enquanto que, os gráficos 6 e 7 mostram para a espessura.

Além dos resultados anteriores, a figura 8 mostra um resumo das janelas criadas para a interface gráfica que une os programas elaborados e compila o código computacional do multi-níveis do EHD, cujos resultados são utilizados para encontrar os coeficientes já citados durante a metodologia.