

24.06.1988

DURVAL DUARTE JUNIOR

Bacharel em Matemática Aplicada, McMaster University, 1974.

Bacharel em Engenharia Nuclear, McMaster University, 1977.

Mestre em Engenharia Nuclear, McMaster University, 1980.

MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO

EM MANCAIS HIDRODINÂMICOS

Tese apresentada à Escola  
Politécnica da USP para a obtenção  
do título de Doutor em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Chien-Ching Tu  
Professor Assistente Doutor do  
Departamento de Engenharia Mecânica da  
Escola Politécnica da USP.

São Paulo, Dezembro de 1987.

FT-469

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer à METAL LEVE, por ter permitido a publicação dos resultados desta pesquisa, feita ao longo dos últimos anos e também a sua permissão para a impressão da listagem do programa de computador desenvolvido.

Ao Professor Dr. Carlos Chien-Ching Tu, pela incansável orientação e incentivo e que, através de sua dedicação, amor à ciência e seu profundo espírito religioso, ultrapassou, em muito, os limites normais da orientação de uma tese acadêmica.

Ao Professor Dr. Clemente Greco, pela sua amizade e incentivo. Seus profundos conhecimentos científicos, aliados à capacidade sem igual de concretizar soluções de problemas práticos, servem como ponto de referência para muitos que desejam se sobressair em engenharia em nosso país.

Aos meus amigos Walter Zottin e Oswaldo Urbani Filho, pela confiança, amizade e pela ajuda em todas as fases de desenvolvimento. Sem eles, este trabalho não poderia ter sido realizado.

A Fátima Ramos, pela ajuda na redação deste texto e pelo apoio moral constante, que muito contribuiu para a conclusão deste trabalho.

A Daniel e Cristina. Duas lindas criaturas, das quais muito me orgulho de ser pai.

Aos meus familiares e a todos que me ajudaram das mais variadas maneiras possíveis. Não é possível mencionar a todos neste contexto, mas serão sempre lembrados com gratidão.

Este trabalho é dedicado ao

Dr. Sanjoy Banerjee,

eminente cientista, cuja inteligência,  
dedicação e sentimento de amizade  
me influenciaram profundamente.

## RESUMO

=====-

Neste trabalho é feita a derivação da equação de Reynolds à partir das equações de conservação da massa e quantidade de movimento. É desenvolvida uma metodologia numérica baseada no método das diferenças finitas e o método da relaxação para a solução da equação de Reynolds para mancais sob carregamento estático e dinâmico. Para implementar o algoritmo de solução numérica foram desenvolvidos dois programas de computador chamado MANCAL e LOCUS, para a simulação de mancais sob carregamento estático e dinâmico, respectivamente. E mostrado como os resultados do programa LOCUS podem auxiliar projetistas de mancais para motores de combustão interna.

O programa LOCUS é usado para simular a órbita de um pino dentro do cubo de um pistão. As pressões hidrodinâmicas obtidas são usadas como condições de contorno para uma análise de distribuição de tensões. E mostrado, pela primeira vez, porque algumas modificações geométricas no cubo do pistão diminuem a probabilidade de trincas na superfície do mesmo e aumentam, consideravelmente, a capacidade de carga do mesmo.

E também introduzido o conceito de perfilamento axial para mancais hidrodinâmicos. E mostrado, através de simulações com o programa LOCUS, que é possível alterar benéficamente os parâmetros operacionais de um mancal através de micro modificações na superfície do mesmo.

**ABSTRACT**  
=====

In this work, Reynolds equation is derived from mass and momentum conservation equations. A numerical scheme based on the finite difference and the relaxation method was developed for the solution of the steady state and time dependent Reynolds equation. Two computer programs named MANCAL and LOCUS were developed to simulate hydrodynamic bearings under static and dynamic loading. It is also shown how the output from the LOCUS program can assist the bearing designer to produce optimized tailor made hydrodynamic bearings.

The LOCUS program is used to simulate the orbit of a pin within a piston's pin boss. The hydrodynamic pressure generated is then used as boundary condition for the piston stress analysis. It is shown for the first time why certain surface geometrical modifications on the piston's pin boss surface can considerably increase its load carrying capacity by diminishing the probability of surface crack generation.

The concept of axial surface profiling is also introduced. Through simulations with the LOCUS program it is shown how the hydrodynamic pressure field of a bearing can be altered by micro-geometrical modifications on the bearing sliding surface. These modifications on the pressure field can be made in such a way as to improve the bearing operational parameters.

## INDICE

=====

Notação e Nomenclatura .....	I
Lista de Figuras .....	III
1. Introdução .....	01
2. Teoria de Mancais Hidrodinâmicos .....	05
2.1. A Equação de Reynolds .....	05
2.2. A Equação de Reynolds para Fluido Incompressível .....	12
2.3. A Equação De Reynolds Para Mancais Radiais .....	12
2.4. A Equação de Reynolds para Mancais Radiais com Carre- gamento Estático .....	14
2.5. A Equação de Reynolds para Mancais Radiais com Aloja- mento Fixo .....	15
3. Solução Numérica da Equação de Reynolds .....	16
3.1. Carregamento Estático .....	16
3.1.1. Condições de Contorno .....	16
3.1.2. Discretização do Domínio .....	18
3.1.3. Aproximações Algébricas .....	21
3.1.4. Solução do Sistema Linear Resultante .....	23
3.1.5. Cálculo da Força Hidrodinâmica .....	28
3.1.6. Cálculo da Vazão do Oleo Lubrificante .....	29
3.1.7. Cálculo do Fator de Excentricidade .....	31
3.1.8. Cálculo da Potência de Atrito .....	32
3.1.9. Cálculo da Viscosidade do Fluido .....	33
3.2. Carregamento Dinâmico .....	35
3.2.1. Orbita do Eixo .....	36

3.2.2.	Cálculo do Fator de Excentricidade e do Angulo Alfa .....	37
3.2.3.	Cálculo do Estimativa Inicial para o Método Iterativo de Newton-Raphson .....	44
3.2.4.	Cálculo das Derivadas da Força Hidrodinâmica ..	46
3.2.5.	Controle Adaptativo do Incremento Temporal ....	49
4.	Descrição dos Programas .....	53
4.1.	Carregamento Estático - Programa MANCAL .....	53
4.1.1.	Descrição Funcional das Subroutines .....	55
4.1.2.	Diagrama em Arvore .....	56
4.1.3.	Fluxograma de Funcionamento .....	57
4.1.4.	Fluxograma de Entrada e Saída de Dados .....	60
4.2.	Carregamento Dinâmico - Programa LOCUS .....	61
4.2.1.	Descrição Funcional das Subroutines .....	64
4.2.2.	Diagrama em Arvore .....	67
4.2.3.	Fluxograma de Funcionamento .....	69
4.2.4.	Fluxograma de Entrada e Saída de Dados .....	73
5.	Comparação dos Resultados do Programa .....	76
5.1.	Comparação dos Resultados para Carregamento Estático .	76
5.1.1.	Comparação dos Resultados para L/D = 1,00 .....	76
5.1.2.	Comparação dos Resultados para L/D = 0,50 .....	79
5.1.3.	Comparação dos Resultados para L/D = 0,25 .....	81
5.2.	Comparação de Resultados com Carregamento Dinâmico ...	86
5.2.1.	Orbita do Eixo com Carregamento Co-Rotativo + Carga Média .....	87
5.2.2.	Orbita do Eixo com Carregamento Vetorial .....	90
6.	Aplicações do Programa LOCUS a Projeto de Mancais .....	92
6.1.	Dados de Entrada e Saída do Programa .....	92

6.2. Órbita do Eixo .....	93
6.3. Gráfico de Pressão Máxima do Filme de Óleo em função do Ângulo no Mancal .....	94
6.4. Gráfico de Espessura Mínima do Filme de Óleo em função do Ângulo no Mancal .....	95
7. Aplicação do Programa LOCUS para a Determinação de Condições de contorno para a Análise de Tensões num Pistão .....	97
7.1. Determinação do Diagrama de Carga .....	98
7.2. Órbita do Pino no Cubo do Pistão .....	98
7.3. Análise de Tensão com Elementos de Gape .....	101
7.4. Análise de Tensão com Pressão Hidrodinâmica .....	103
8. Perfilamento Axial em Mancais Hidrodinâmicos Radiais .....	106
8.1. Parâmetros Operacionais de um Mancal Convencional, .....	107
8.2. Introdução de Perfilamento no Sentido Axial .....	109
8.3. Resultado das Modificações Geométricas .....	114
8.4. Limitações e Alternativas .....	117
9. Conclusão e Recomendações .....	120
Apêndice: Listagem do Programa .....	123
Referências Bibliográficas .....	201



NOTAÇÃO E NOMENCLATURA

-----

- $u_y$  = velocidade do fluido lubrificante (m/s)  
 $u$  = velocidade do fluido no eixo x (m/s)  
 $v$  = velocidade do fluido no eixo y (m/s)  
 $w$  = velocidade do fluido no eixo z (m/s)  
 $f_i$  = força específica devido a campos externos (N/Kg)  
 $t$  = tempo (s)  
 $x$  = coordenada circunferencial (m)  
 $y$  = coordenada no sentido da espessura do filme (m)  
 $z$  = coordenada no sentido axial (m)  
 $h$  = espessura do filme de óleo (m)  
 $p$  = pressão termodinâmica (Pa)  
 $R$  = raio do eixo (m)  
 $e$  = excentricidade do mancal (m)  
 $U_1$  = velocidade tangencial do alojamento (m/s)  
 $U_2$  = velocidade tangencial do eixo (m/s)  
 $V$  = velocidade vertical do eixo (m/s)  
 $\Delta x_i$  = distância entre o ponto (i-1) e o ponto (i) no eixo x (m)  
 $\Delta z_j$  = distância entre o ponto (j-1) e o ponto (j) no eixo z (m)  
 $\dot{m}$  = vazão mássica de óleo (Kg/s)  
 $\dot{w}$  = calor gerado por dissipação viscosa (w)  
 $C$  = calor específico do óleo (J/Kg-°C)  
 $F_t$  = componente tangencial da força hidrodinâmica (N)  
 $F_r$  = componente radial da força hidrodinâmica (N)

- $W_t$  = componente tangencial da força aplicada (N)
- $W_R$  = componente radial da força aplicada (N)
- $F_x$  = componente x da força hidrodinâmica (N)
- $F_y$  = componente y da força hidrodinâmica (N)
- $W_x$  = componente x da força aplicada (N)
- $W_y$  = componente y da força aplicada (N)
- $\rho$  = densidade do fluido lubrificante ( $\text{Kg/m}^3$ )
- $\sigma_{ij}$  = tensor de tensões internas do fluido ( $\text{N/m}^2$ )
- $\delta_{ij}$  = delta de Kronecker
- $\mu$  = viscosidade do fluido lubrificante (Pa-s)
- $\omega$  = velocidade angular do eixo (r/s)
- $\theta$  = ângulo entre a linha de centros e um ponto qualquer no mancal (r)
- $\beta$  = coeficiente de relaxação
- $\tau$  = tensão de cisalhamento (N/m)
- $\delta$  = critério de convergência
- $\psi$  = ângulo entre a linha vertical e a carga aplicada (r)
- $\phi$  = ângulo entre a carga aplicada e a linha de centros (r)
- $\epsilon$  = fator de excentricidade do mancal
- $\Delta\epsilon$  = incremento do fator de excentricidade
- $\Delta\alpha$  = incremento do ângulo alfa (r)

**LISTA DE FIGURAS**  
 =====

Capítulo 2

Fig. 2.1(a)	Mancal Radial .....	07
Fig. 2.1(b)	Sistema de Coordenadas, Ignorando-se Efeitos de Curvatura .....	07
Fig. 2.2	Velocidades do Eixo relativas ao Alojamento ....	11
Fig. 2.3	Componentes de Velocidade num Mancal Radial Devido à Velocidade Angular do Eixo .....	12
Fig. 2.4	Sistema de Coordenadas Móveis para Mancais Radiais .....	14

Capítulo 3

Fig. 3.1	Sistema de Coordenadas com relação à Linha de Centros .....	16
Fig. 3.2	Discretização do Domínio .....	18
Fig. 3.3	Campo de Pressão de um Mancal Hidrodinâmico Radial .....	19
Fig. 3.4	Discretização Variável do Eixo x .....	20
Fig. 3.5	Molécula Computacional .....	21
Fig. 3.5(a)	Número de Iterações necessário para Convergência para $L/D = 0,2$ .....	26
Fig. 3.5(b)	Número de Iterações necessário para Convergência para $L/D = 1,0$ .....	27
Fig. 3.6	Componentes da Força Hidrodinâmica .....	28
Fig. 3.7	Distribuição da Velocidade $u(y)$ .....	32
Fig. 3.8	Carregamento Aplicado a um Mancal .....	36
Fig. 3.9	Orbita do Eixo de um Mancal .....	37
Fig. 3.10	Decomposição da Carga Aplicada .....	38

Fig. 3.11 Força Hidrodinâmica devido a Movimentos do Centro do Eixo ..... 48

Capítulo 4

Fig. 4.1 Representação Esquemática do Programa MANCAL ... 54  
Fig. 4.2 Representação Esquemática do Programa LOCUS .... 61

Capítulo 5

Fig. 5.2.1 Orbita Carga Média  $2w' = 10$  ..... 88  
Fig. 5.2.2 Orbita Carga Média  $2w' = 15$  ..... 89  
Fig. 5.2.3 Orbita Carga Média  $2w' = 75$  ..... 89  
Fig. 5.2.4 Orbita do Carregamento Vetorial (Co-Rotativo + Co-Rotativo) ..... 90  
Fig. 5.2.5 Orbita do Carregamento Vetorial (Co-Rotativo + Contra-Rotativo) ..... 91

Capítulo 6

Fig. 6.1 Dados de Entrada e Saída do Programa ..... 92  
Fig. 6.2 Orbita do Eixo ..... 93  
Fig. 6.3 Pressão Máxima do Filme de Oleo em função do Angulo no Mancal ..... 95  
Fig. 6.4 Espessura Mínima do Filme de Oleo em função do Angulo no Mancal ..... 96

Capítulo 7

Fig. 7.1 Furo para Pino com Alívios Laterais ..... 97  
Fig. 7.2 Força Resultante no Eixo X (Vertical) ..... 98  
Fig. 7.3 Força Resultante no Eixo Y (Horizontal) ..... 99

Fig. 7.4	Orbita do Pino no Cubo do Pistão com Folga Diametral de 5 microns .....	100
Fig. 7.5	Orbita do Pino no Cubo do Pistão com Folga Diametral de 50 microns .....	100
Fig. 7.6	Orbita do Pino no Cubo do Pistão com Folga Diametral de 90 microns .....	101
Fig. 7.7	Distribuição de Tensão num Corte Transversal ao Pino .....	102
Fig. 7.8	Distribuição de Tensão num Corte Paralelo ao Pino .....	102
Fig. 7.9	Distribuição de Tensão num Corte Perpendicular ao Pino Considerando-se a Pressão hidrodinâmica ...	103
Fig. 7.10	Distribuição de Tensão num Corte Paralelo ao Pino Considerando-se a Pressão Hidrodinâmica ...	104
Fig. 7.11	Perfil de Pressão Hidrodinâmica e Tensão de Tração no Cubo sem Alívio Lateral .....	105
Fig. 7.12	Perfil de Pressão Hidrodinâmica e Tensão de Tração no Cubo com Alívio Lateral .....	105

Capítulo 8

Fig. 8.1	Carga Aplicada ao Mancal .....	106
Fig. 8.2	Orbita do Eixo .....	107
Fig. 8.3	Pressão Máxima do Filme de Oleo em função do Angulo no Mancal .....	108
Fig. 8.4	Espessura Mínima do Filme de Oleo em função do Angulo no Mancal .....	108
Fig. 8.5	Resumo das Principais Propriedades .....	109
Fig. 8.6(a)	Campo de Pressão Circunferencial .....	110
Fig. 8.6(b)	Campo de Pressão Axial .....	110
Fig. 8.7	Mancal com Canaleta Central .....	110
Fig. 8.8	Campo de Pressão num Mancal com "Canaleta Rasa" .....	111
Fig. 8.9	Perfilamento Superficial Co-senoidal .....	112

Fig. 8.10	Campo de Pressão para alguns Valores de Profundidade do Perfilamento .....	113
Fig. 8.11	Pressão Máxima do Filme de Oleo versus Profundidade do Perfilamento .....	114
Fig. 8.12	Vazão de Oleo em função da Profundidade do Perfilamento .....	115
Fig. 8.13	Espessura Mínima do Filme de Oleo em função da Profundidade do Perfilamento .....	116
Fig. 8.14	Distribuição de Micro-Ranhuras .....	117
Fig. 8.15	Campo de Pressão Axial gerado em uma Superfície de Micro-Ranhuras .....	118

## 1. INTRODUCAO

Um mancal hidrodinâmico é um elemento de máquina normalmente usado entre duas peças rígidas e em movimento relativo. A finalidade do mancal hidrodinâmico é a de substituir o atrito de contacto entre as duas peças em movimento pelo atrito viscoso no fluido lubrificante do mancal.

A tendência atual é de crescimento acelerado da potência específica dos motores de combustão interna, o que implica numa maior pressão na câmara de combustão e maior velocidade dos pistões, fatores estes que prejudicam sensivelmente a operação normal dos mancais. Para atender esta tendência, torna-se imperativo o conhecimento detalhado dos mecanismos que regem os processos físicos de um mancal para que se possa projetar mancais adaptáveis à nova realidade. Fatores tais como: órbita do eixo, pressão máxima e espessura mínima de filme, são informações fundamentais para o projeto otimizado de mancais hidrodinâmicos.

A modelagem matemática tradicional de um mancal hidrodinâmico baseia-se na equação de Reynolds que é uma equação elíptica de derivadas parciais, de segunda ordem e em regime transitório. A simulação de um mancal sob condições reais de funcionamento pode ser obtida através da solução desta equação. Porém a equação de Reynolds na sua forma mais genérica não possui solução analítica e é necessário, portanto, resolvê-la através de métodos numéricos.

Antes do advento do computador (década de 60) era praticamente impossível de se obter uma solução numérica da equação de Reynolds na sua forma mais genérica devido a altíssima quantidade de cálculo necessário. Devido à este fato desenvolveram-se equações simplificadas passíveis de solução analítica (1). Estas equações foram desenvolvidas baseando-se no fato de que em certos mancais, a razão entre dimensões características distintas pode ser bastante diferente de um, e portanto, poder-se-ia, em

tese, desprezar uma das derivadas da equação. Baseado nesta idéia foram desenvolvidas duas teorias que tiveram bastante aceitação prática : a teoria de mancais infinitamente curto (teoria de Ockvirk) e a teoria de mancais infinitamente longo (teoria de Sommerfeld). Porém, as equações advindas destas teorias produzem resultados confiáveis somente dentro de certos limites bastante restritos e, em particular, como será visto posteriormente, não são apropriadas para aplicação à mancais de motores de combustão interna.

Uma das primeiras tentativas bem sucedidas no sentido de se conseguir uma solução numérica para a equação de Reynolds bi-dimensional e em regime transitório foi no final da década de sessenta (5), porém este trabalho era restrito à mancais radiais perfeitamente circulares e axialmente alinhados. Durante a década de 70 e 80, vários trabalhos foram desenvolvidos (37,40, 42,43), porém, devido à complexidade do problema, nenhum destes métodos foi adotado, num contexto industrial, para a simulação rotineira de mancais hidrodinâmicos de geometria arbitrária (não perfeitamente cilíndricos), devido ao altíssimo tempo de processamento necessário. Projetistas de mancais, em sua grande maioria, continuam se baseando nas teorias simplificadas, expostas acima, para a solução dos problemas cotidianos de projeto de mancais hidrodinâmicos.

Este trabalho versa sobre o desenvolvimento de uma metodologia numérica para a solução da equação geral de Reynolds e sua implementação através de um programa computacional escrito em linguagem de alto nível (FORTRAN 77). O programa aqui apresentado pode ser usado para simular o comportamento de mancais hidrodinâmicos radiais com qualquer tipo de geometria e carregamento, com um tempo de processamento ("CPU time") relativamente reduzido tornando-o, portanto, viável de aplicação num contexto industrial. Os resultados advindos desta simulação podem fornecer subsídios valiosos para projetistas de máquinas reciprocativas em geral e, em particular, a projetistas de motores de combustão interna.



O cubo e o pino de um pistão podem funcionar, as vezes, como um mancal hidrodinâmico. Um das causas de falha prematura de um pistão é a ocorrência de trincas na superfície do cubo. Para minimizar a probabilidade de geração de trincas foram desenvolvidos vários recursos (34) , (36) . Entre eles o conceito de "alívios laterais" é amplamente usado, com sucesso, no aumento de capacidade de carga do pistão. A razão dada para o funcionamento destes alívios laterais era que os mesmos absorviam as deformações do pino e portanto diminuam a tensão gerada. Porém, em testes de laboratório ficou constatado (34) que o surgimento destas trincas era devido, também, ao filme de óleo e não somente à deformação do pino como era acreditado anteriormente. Para melhor entender o fenômeno, usou-se o programa LOCUS para simular a órbita de um pino dentro do cubo de um pistão. As pressões hidrodinâmicas geradas foram , então, usadas como condição de contorno para uma análise de distribuição de tensão no cubo do pistão. Ficou comprovado que estes alívios laterais modificam o campo de pressão hidrodinâmico de tal maneira a diminuir consideravelmente a tensão trativa na região de geração de trincas, comprovando assim, o achado experimental.

A falha prematura de um mancal hidrodinâmico pode ser devido à varios fatores : pressão excessiva, espessura de filme muito baixa e cavitação, entre outros. Todos estes fatores, porém, estão relacionados, direta ou indiretamente, com o campo de pressão hidrodinâmica gerado no mancal. Através de simulações com o programa LOCUS é possível determinar a influência que micro modificações na superfície de deslizamento do mancal podem ter no campo de pressão. Baseado nesta idéia é apresentado o conceito de um novo tipo de mancal com perfilamento superficial no sentido axial. É mostrado, através de simulações, que este novo tipo de mancal tem uma série de vantagens, do ponto de vista funcional, sobre os mancais tradicionais. Para mostrar as vantagens do novo tipo de mancal, foi feita uma simulação de um

mancal de motor de combustão interna, sem perfilamento axial, e com um carregamento dinâmico típico. Posteriormente, foi introduzida a modificação geométrica no mancal e o mesmo foi novamente simulado pelo programa. As diferenças nas características operacionais entre os dois tipos de mancais foram analisadas quantitativamente.

## 2 - TEORIA DE MANCAIS HIDRODINÂMICOS

Neste capítulo será desenvolvida a equação de Reynolds nas suas várias formas.

### 2.1 - A Equação de Reynolds

A Equação de Reynolds forma a base do modelamento matemático de mancais hidrodinâmicos. A mesma é derivada das equações de conservação da massa e conservação da quantidade de movimento, que são dadas a seguir (6):

Massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k)}{\partial x_k} = 0 \quad (2.1)$$

Quantidade de movimento:

$$\rho \left[ \frac{\partial u_j}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right] = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_j \quad (2.2)$$

onde :

$\rho$  = densidade do fluido ( Kg/m<sup>3</sup> )

$u_j$  = velocidade do fluido ( m/s )

$f_j$  = força específica devido a campos externos ( N/Kg )

$\sigma_{ij}$  = tensor de tensões internas do fluido ( N/m<sup>2</sup> )

Para o desenvolvimento da equação de Reynolds, faz-se uso das seguintes hipóteses simplificativas:

I. Forças de campo desprezíveis:

$$f_j = 0$$

II. Forças inerciais desprezíveis:

$$\frac{du_j}{dt} = \left[ \frac{\partial u_j}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right] = 0$$

III. A densidade do fluido não varia com o tempo:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

Com as simplificações acima, as equações de conservação da massa e quantidade de movimento passam a ser:

Massa:

$$\frac{\partial (\rho u_k)}{\partial x_k} = 0 \quad (2.3)$$

Quantidade de movimento:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0 \quad (2.4)$$

IV. A espessura do filme lubrificante é muito pequena comparada com as outras dimensões; Portanto, despreza-se efeitos de curvatura, conforme esquematizado nas figuras 2.1 (a) e 2.1 (b). Com esta simplificação, pode-se usar coordenadas cartesianas.

V. Fluido Newtoniano:

O tensor de tensões internas para um fluido newtoniano é dado por (6):

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

VI. Comparado com os gradientes de velocidade  $\partial u/\partial y$  e  $\partial w/\partial y$ , todos os outros são desprezíveis. Assim sendo, despreza-se as seguintes derivadas:

$$\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial z}$$

A hipótese acima é válida, neste caso, considerando-se que as velocidades  $u$  e  $w$  (nos sentidos  $x$  e  $z$ , respectivamente) são predominantes e  $y$  é uma dimensão bastante menor que  $x$  ou  $z$ .

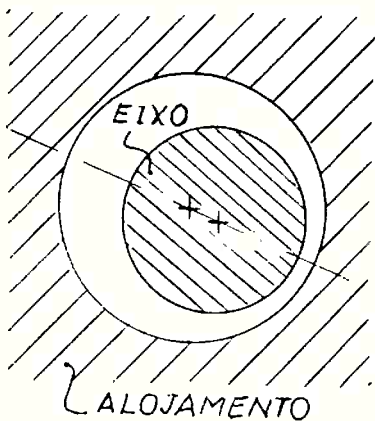


Fig. 2.1 (a) - Mancal Radial

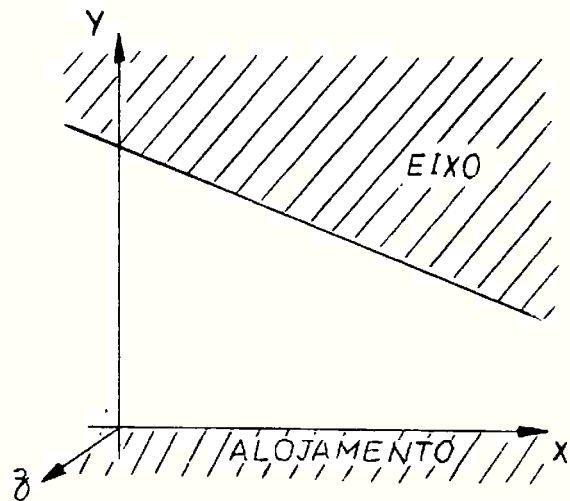


Fig. 2.1 (b) - Sistema de Coordenadas, ignorando-se Efeitos de Curvatura

Com as simplificações acima, tem-se:

Massa:

$$\frac{\partial (\rho u_k)}{\partial x_k} = 0 \quad (2.5)$$

Quantidade de movimento:

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{d^2 u}{dy^2} \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{d^2 w}{dy^2} \quad (2.7)$$

Integrando as equações (2.6) e (2.7) duas vezes com relação a  $y$ , e impondo as condições de contorno

$$u(y=0) = U_1 \quad ; \quad u(y=h) = U_2$$

$$w(y=0) = 0 \quad ; \quad w(y=h) = 0 ,$$

tem-se:

$$u = \frac{1}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) [y(y-h)] + \left( \frac{h-y}{h} \right) U_1 + \left( \frac{y}{h} \right) U_2 \quad (2.8)$$

$$w = \frac{1}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) [y(y-h)] \quad (2.9)$$

Substituindo por (2.8) e (2.9) na equação (2.5), tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho v)}{dy} = & - \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{\rho}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) [y(y-h)] \right\} + \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\rho}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) [y(y-h)] + \rho \left( \frac{h-y}{h} \right) U_1 + \rho \left( \frac{y}{h} \right) U_2 \right\} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Integrando a equação acima com relação a  $y$  no intervalo  $[0, h(x, t)]$  e impondo as seguintes condições de contorno:

$$v(y=0) = 0 \quad ; \quad v(y=h) = V$$

obté-m-se:

$$\begin{aligned} - \int_{y=0}^{h(x, t)} \frac{d(\rho v)}{dy} dy = & \int_{y=0}^{h(x, t)} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \frac{\rho}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) [y(y-h)] \right\} dy \\ + \int_{y=0}^{h(x, t)} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\rho}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) [y(y-h)] + \rho \left( \frac{h-y}{h} \right) U_1 + \rho \left( \frac{y}{h} \right) U_2 \right\} dy \end{aligned} \quad (2.11)$$

Integrando o lado esquerdo da equação acima, tem-se:

$$- \left[ \rho v(y) \right]_{y=0}^{y=h(x, t)} = - \left[ \rho v(y=h) - \rho v(y=0) \right] = -\rho V \quad (2.12)$$

Para a solução das integrais definidas, que aparecem ao lado direito da equação (2.11), usa-se o teorema de Leibnitz que é dado a seguir (18):

$$\begin{aligned} \int_{\phi_1(\alpha)}^{\phi_2(\alpha)} \frac{\partial}{\partial \alpha} [f(y, \alpha)] dy = & \frac{\partial}{\partial \alpha} \int_{\phi_1(\alpha)}^{\phi_2(\alpha)} f(y, \alpha) dy - f[\phi_2(\alpha), \alpha] \frac{\partial \phi_2}{\partial \alpha} + \\ & + f[\phi_1(\alpha), \alpha] \frac{\partial \phi_1}{\partial \alpha} \end{aligned}$$

Aplicando o teorema acima para o segundo termo do lado direito da equação (2.11), tem-se:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial x} \int_{y=0}^{h(x,t)} \left\{ \frac{\rho}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) [y(y-h)] + \rho \left( \frac{h-y}{h} \right) U_1 + \left( \frac{\rho y}{h} \right) U_2 \right\} dy + \\
 & - \left\{ \frac{\rho}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) [h(Y-h)] + \rho \left( \frac{Y-h}{h} \right) U_1 + \frac{\rho h}{h} U_2 \right\} \frac{\partial h}{\partial x} = \\
 & = \frac{\partial}{\partial x} \left( -\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} [\rho h (U_1 + U_2)] - U_2 \frac{\partial (\rho h)}{\partial x} = \\
 & = \frac{\partial}{\partial x} \left( -\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} (U_1 - U_2) \frac{\partial (\rho h)}{\partial x} + \frac{\rho h}{2} \frac{\partial}{\partial x} (U_1 + U_2) \quad (2.13)
 \end{aligned}$$

Aplicando o teorema de Leibnitz para o primeiro termo da equação (2.11), tem-se:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial z} \int_{y=0}^{h(x,t)} \left\{ \frac{\rho}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) [y(y-h)] \right\} dy - \frac{\rho}{2\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) [h(Y-h)] \frac{\partial h}{\partial z} = \\
 & = \frac{\partial}{\partial z} \left( -\frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (2.14)
 \end{aligned}$$

Igualando a equação (2.12) à soma das equações (2.13) e (2.14), tem-se:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{1}{2} (U_1 - U_2) \frac{\partial (\rho h)}{\partial x} + \\
 & + \frac{1}{2} \rho h \frac{\partial}{\partial x} (U_1 + U_2) + p v \quad (2.15)
 \end{aligned}$$



Considere a figura 2.2. Seja  $\omega$  a velocidade angular do eixo e  $\dot{e}$  e  $e\dot{\alpha}$  as velocidades tangencial e perpendicular à linha de centros, devido ao movimento relativo do centro do eixo. As velocidades  $U_2$  e  $V$  são dadas por:

$$U_2 = R\omega + \dot{e}\sin(\theta) - e\dot{\alpha}\cos(\theta) \quad (2.16)$$

$$V = \dot{e}\cos(\theta) + e\dot{\alpha}\sin(\theta) \quad (2.17)$$

Diferenciando  $U_2$  com relação a  $x$ , tem-se:

$$\frac{\partial U_2}{\partial x} = \frac{1}{R} [\dot{e}\cos(\theta) + e\dot{\alpha}\sin(\theta)] = \frac{V}{R} \quad (2.18)$$

O lado direito da equação (2.15) contém

$$\frac{\rho h}{2} \frac{\partial}{\partial x} (U_1 + U_2) + \rho V = \frac{\rho h}{2} \frac{\partial U_2}{\partial x} + \rho V \quad (2.19)$$

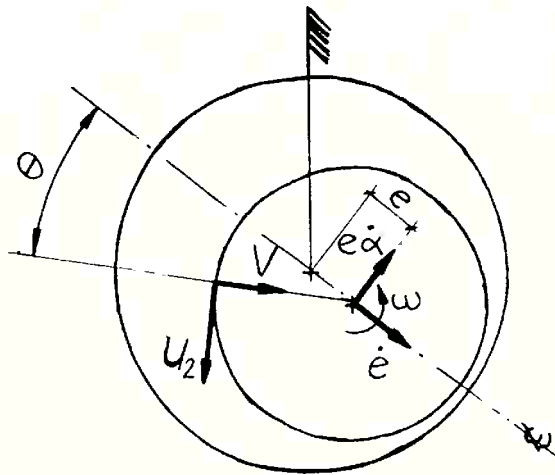


Fig. 2.2 - Velocidades do Eixo relativas ao Alojamento

Substituindo pela expressão da equação (2.18) na equação (2.19) tem-se:

$$\frac{\rho h}{2} \frac{\partial}{\partial x} (U_1 + U_2) + \rho V = \frac{\rho V}{2} \left[ \frac{h}{R} + 2 \right]$$

Como  $(h/R) \ll 2$ , tem-se que:

$$\frac{\rho h}{2} \frac{\partial}{\partial x} (U_1 + U_2) + \rho V = \rho V$$

Substituindo pela expressão acima, na equação (2.15), obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 (U_1 - U_2) \frac{\partial (\rho h)}{\partial x} + 12 \rho V \quad (2.20)$$

A equação acima é a equação de Reynolds para mancais hidrodinâmicos. A seguir, serão considerados alguns casos particulares desta equação.

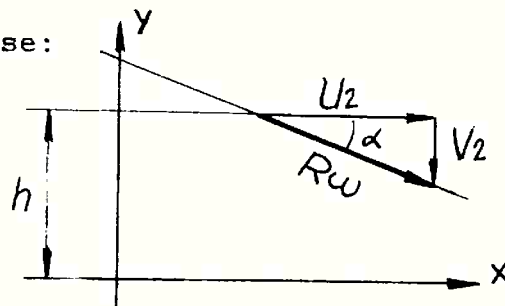
## 2.2 - A Equação de Reynolds para Fluido Incompressível

Para um fluido incompressível, a densidade não varia. Neste caso, tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 (U_1 - U_2) \frac{\partial h}{\partial x} + 12V \quad (2.21)$$

## 2.3 - A Equação de Reynolds para Mancais Radiais

Para um mancal radial, tem-se:



$$U_2 = R\omega \cos(\alpha) \approx R\omega$$

$$V_2 = R\omega \sin(\alpha)$$

$$\approx R\omega \frac{\partial h}{\partial x}$$

Fig. 2.3 - Componentes de Velocidade num Mancal Radial devido à Velocidade Angular do Eixo.

Substituindo pela expressão acima, no lado direito da equação (2.20), tem-se:

$$6(U_1 - U_2) \frac{\partial h}{\partial x} + 12V = 6(U_1 - R\omega) \frac{\partial h}{\partial x} + \\ + 12 \left( \frac{\partial h}{\partial t} + R\omega \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 6(U_1 + R\omega) \frac{\partial h}{\partial x} + 12 \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.22)$$

onde  $(\partial h / \partial t)$  é a variação de espessura do filme lubrificante, em função do tempo, devido a movimentos do centro do eixo.

Substituindo pela equação (2.22) em (2.21), tem-se a equação de Reynolds para mancais radiais:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6(U_1 + R\omega) \frac{\partial h}{\partial x} + 12 \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.23)$$

onde :

$h$  = espessura do filme lubrificante ( m )

$\mu$  = viscosidade do fluido lubrificante ( Pa-s )

$p$  = pressão termodinâmica ( Pa )

$U_1$  = velocidade horizontal do mancal ( m/s )

$R$  = raio do eixo ( m )

$\omega$  = velocidade angular do eixo ( r/s )

$\frac{\partial h}{\partial t}$  = variação temporal da espessura do filme devido a movimentos do centro do eixo (m/s)

Considere a figura 2.4. A variação da espessura do filme lubrificante pode ser expressa em termos da excentricidade do eixo e do ângulo alfa, da seguinte maneira:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \dot{e} \cos(\theta) + e \dot{\theta} \sin(\theta) \quad (2.24)$$

Substituindo pela expressão da equação (2.24) na equação (2.23), tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6(U_1 + R\omega) \frac{\partial h}{\partial x} + 12[\dot{e} \cos(\theta) + e \dot{\alpha} \sin(\theta)] \quad (2.25)$$

que é a equação de Reynolds para mancais radiais no sistema de coordenadas móveis (vide figura 2.4).

#### 2.4 - A Equação de Reynolds para Mancais Radiais e com Carregamento Estático

Se a carga aplicada ao mancal não variar com o tempo, em módulo e ângulo de aplicação, daí, então, o centro do eixo não se movimenta com o tempo. Neste caso, tem-se:

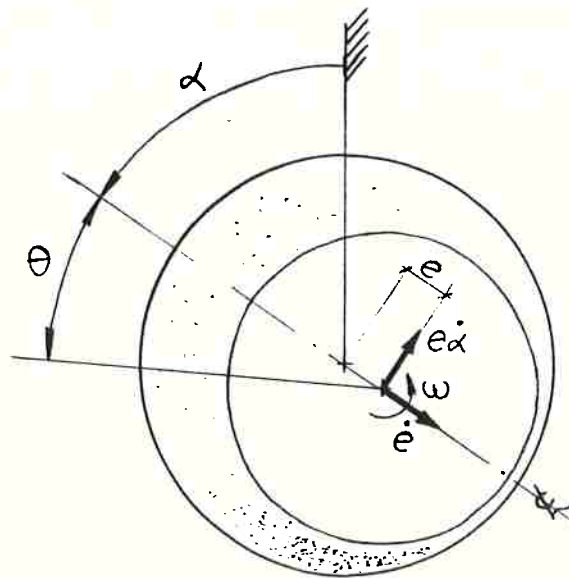


Fig. 2.4 - Sistema de Coordenadas Móveis para Mancais Radiais

$$\dot{e} = \dot{\alpha} = 0$$

e a equação (2.25) passa a ser:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6(U_1 + R\omega) \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.26)$$

### 2.5 - A Equação de Reynolds para Mancais Radiais e com Alojamento Fixo

Se o alojamento do mancal estiver fixo, U será nulo, e neste caso as equações (2.25) e (2.26) podem ser expressas por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 12 \left[ \pi RN \frac{\partial h}{\partial x} + \right. \\ \left. + \dot{e} \cos(\theta) + e \dot{\alpha} \sin(\theta) \right] \quad (2.27)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 12\pi RN \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.28)$$

onde N é a velocidade angular do eixo em rotações por segundo.

### 3 - SOLUÇÃO NUMÉRICA DA EQUAÇÃO DE REYNOLDS

A equação básica utilizada para a simulação de mancais hidrodinâmicos radiais é a equação (2.27) desenvolvida no capítulo anterior :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 12R\omega \frac{\partial h}{\partial x} + 12(\dot{\epsilon} \cos(\theta) + e\dot{\alpha} \sin(\theta)) \quad (3.1)$$

#### 3.1 - Carregamento Estático

Se a carga aplicada ao mancal não variar em módulo nem em ângulo de aplicação, daí então o eixo não se movimenta e a espessura do filme não varia com o tempo. Considerando-se, também, viscosidade constante, tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 12\mu R\omega \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3.2)$$

##### 3.1.1 - Condições de Contorno

Considere a figura 3.1. A pressão hidrodinâmica tem valor nulo no ponto  $x = 0$ . Assim sendo, tem-se:

$$p(x=0) = p(x=2\pi R) = 0$$

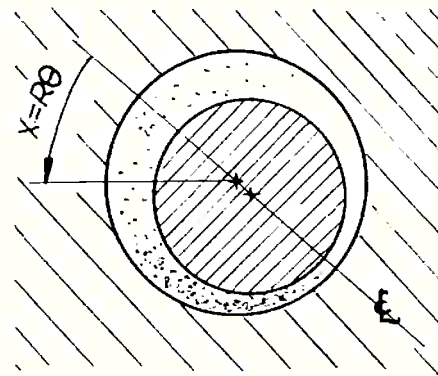


Fig. 3.1 - Sistema de coordenadas com relação à linha de centros.

A solução da equação (3.2) somente com a condição de contorno acima será um campo com valores positivos e negativos. Sabe-se, porém, que um fluido não resiste tração. Assim sendo, impõe-se, também, a seguinte condição de contorno:

$$\text{se } p(x) < 0, \text{ então} \quad \left\{ \begin{array}{l} p(x) = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \end{array} \right. \quad (3.3)$$

A condição acima é comumente chamada condição de contorno de Reynolds e é usada para evitar tracionamento (valores negativos de pressão) no fluido lubrificante.

A condição (3.3) torna a equação (3.2) não linear e por este motivo a mesma não possui soluções analíticas suficientemente genéricas, por isso é necessário resolvê-las através de métodos numéricos. Existem dois métodos de solução que tem sido amplamente usado para a solução da equação de Reynolds : diferenças finitas e elementos finitos. Cada um destes métodos possuem vantagens e desvantagens. O método dos elementos finitos é consideravelmente mais complexo em termos de implementação porém é mais apropriado para a solução de problemas com contornos geométricos irregulares. Estudos comparativos ( 32 e 34 ) demonstram que para a solução da equação de Reynolds através de métodos de baixa ordem de aproximação ("low order accuracy") não há vantagens relevantes entre os dois métodos.

O método adotado, neste caso, foi o método das diferenças finitas (9) que consiste na aproximação das derivadas por quocientes de diferenças, transformando, portanto, um sistema diferencial num sistema de equações algébricas.

### 3.1.2 - Discretização do Domínio

A discretização é feita dividindo-se o domínio em  $I \times J$  pontos computacionais, conforme ilustrado na figura 3.2.

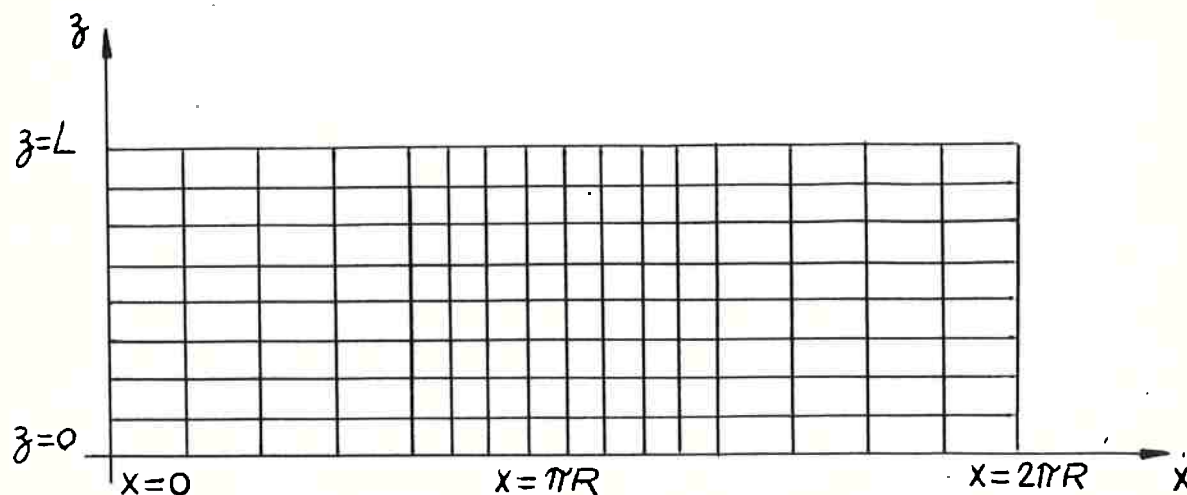


Fig. 3.2 - Discretização do Domínio

Qualquer ponto no domínio pode ser representado por:

$$p_{i,j} = p \left( \sum_{l=1}^i \Delta x_l, \sum_{k=1}^j \Delta z_k \right)$$

onde:

$I$  é o número total de pontos no eixo  $x$

$J$  é o número total de pontos no eixo  $z$

$\Delta x_l$  é o incremento espacial do eixo  $x$  entre o ponto  $(l-1)$  e o ponto  $(l)$

$\Delta z_k$  é o incremento espacial do eixo  $z$  entre o ponto  $(k-1)$  e o ponto  $(k)$



O campo de pressão de um mancal hidrodinâmico tem um formato conforme esquematizado na figura 3.3. Os maiores gradientes de pressão são bastante mais acentuados na região  $x = \pi \cdot R$ . Assim sendo, torna-se benéfico fazer um refinamento maior nesta região.

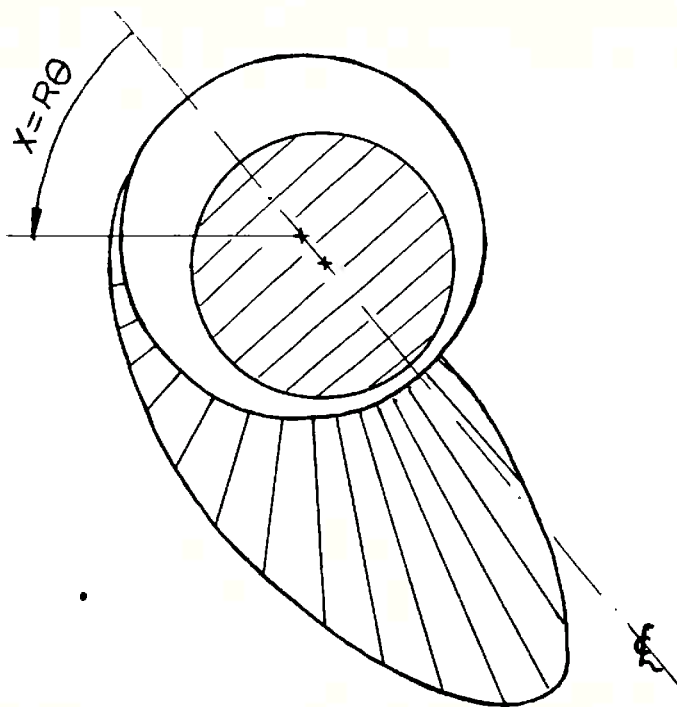


Fig. 3.3 - Campo de Pressão de um Mancal Hidrodinâmico Radial

A maneira adotada para conseguir tal refinamento foi a seguinte (05):

$$\Delta x_i = c1 * ( 1.0 + c2 * \cos( x_i / R ) ) \quad (3.4)$$

onde:

$$c2 = 0.75 \quad \text{se} \quad \epsilon < 0.975$$

$$c2 = 0,75 + 10.0 * ( \epsilon - 0.975 ) \quad \text{se} \quad \epsilon > 0.975$$

onde  $\epsilon$  é um adimensional (fator de excentricidade) definido pela razão entre o deslocamento do eixo dividido pela folga radial.

O tamanho relativo de cada malha está esquematizado na figura 3.4

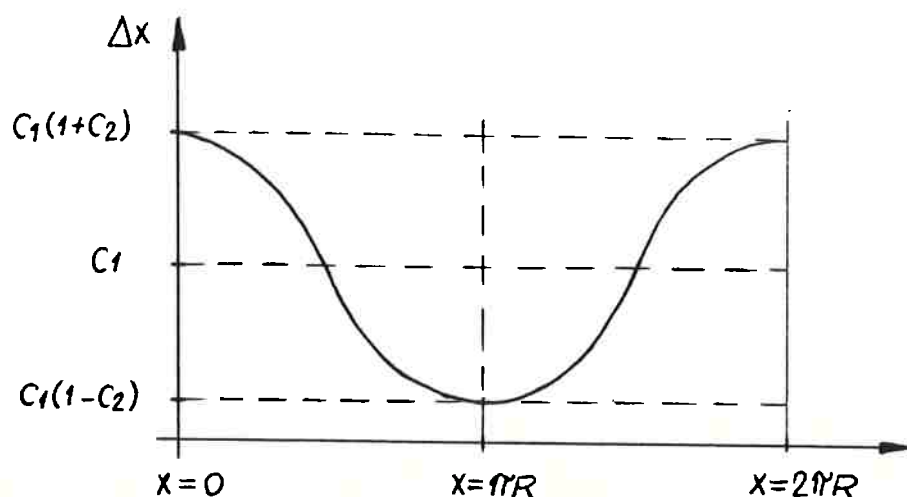


Fig. 3.4 - Discretização Variável do Eixo x

A soma dos incrementos deve ser igual à  $2\pi R$ :

$$\sum_{i=1}^I \Delta x_i = 2\pi R \quad (3.5)$$

Substituindo pela expressão acima em (3.4), tem-se:

$$C1 = \frac{2\pi R}{\sum_{i=1}^I \left[ 1 + C2 * \cos(x_i / R) \right]} \quad (3.6)$$

### 3.1.3 - Aproximações Algébricas

No método das diferenças finitas, aproxima-se as derivadas da equação de derivadas parciais por quocientes de diferenças devidamente consistentes com o operador diferencial (9).

As expressões algébricas, que aproximam as derivadas da equação (3.2), são baseadas na molécula computacional dada pela figura (3.5)

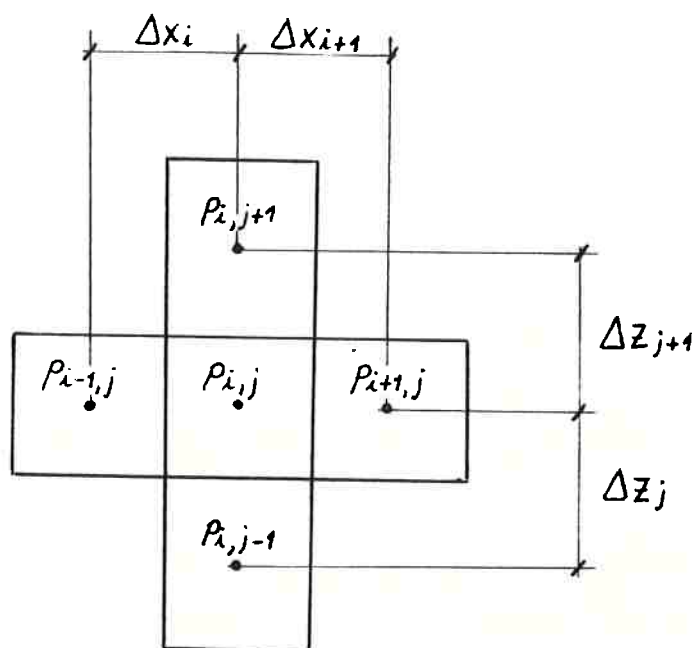


Fig. 3.5 - Molécula Computacional

As aproximações algébricas adotadas foram :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{p_{i+1,j} (h_{i+1/2,j}^3 \Delta x_i) + p_{i-1,j} (h_{i-1/2,j}^3 \Delta x_{i+1})}{1/2[(\Delta x_i \Delta x_{i+1}) (\Delta x_i + \Delta x_{i+1})]} +$$

$$- \frac{(h_{i+1/2,j}^3 \Delta x_i + h_{i-1/2,j}^3 \Delta x_{i+1}) p_{i,j}}{1/2[(\Delta x_i \Delta x_{i+1}) (\Delta x_i + \Delta x_{i+1})]} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{p_{i,j+1} (h_{i,j+1/2}^3)^{\Delta z_j} + p_{i,j-1} (h_{i,j-1/2}^3)^{\Delta z_{j+1}}}{1/2[(\Delta z_j \Delta z_{j+1}) (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})]} +$$

$$- \frac{(h_{i,j+1/2}^3)^{\Delta z_j} + (h_{i,j-1/2}^3)^{\Delta z_{j+1}}}{1/2[(\Delta z_j \Delta z_{j+1}) (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})]} p_{i,j} \quad (3.8)$$

As espessuras de filme usadas nas equações (3.7) e (3.8) são valores médios dados por:

$$h_{i+1/2,j} = \frac{h_{i,j} + h_{i+1,j}}{2}$$

$$h_{i-1/2,j} = \frac{h_{i,j} + h_{i-1,j}}{2}$$

$$h_{i,j+1/2} = \frac{h_{i,j} + h_{i,j+1}}{2}$$

$$h_{i,j-1/2} = \frac{h_{i,j} + h_{i,j-1}}{2}$$

Substituindo pelas expressões (3.7) e (3.8) na equação (3.2), tem-se:

$$p_{i,j} = (C_e p_{i-1,j} + C_d p_{i+1,j} + C_i p_{i,j-1} +$$

$$+ C_s p_{i,j+1} + C_c) / \text{DENOM} \quad (3.9)$$

onde:

$$C_e = \frac{h_{i-1/2,j}^3 \Delta x_{i+1}}{1/2 \Delta x_i \Delta x_{i+1} (\Delta x_i + \Delta x_{i+1})}$$

$$C_d = \frac{h_{i+1/2,j}^3 \Delta x_i}{1/2 \Delta x_i \Delta x_{i+1} (\Delta x_i + \Delta x_{i+1})}$$

$$C_i = \frac{h_{i,j-1/2}^3 \Delta z_{j+1}}{1/2 \Delta z_j \Delta z_{j+1} (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})}$$

$$C_s = \frac{h_{i,j+1/2}^3 \Delta z_j}{1/2 \Delta z_j \Delta z_{j+1} (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})}$$

$$C_c = 12\mu R_w \left[ \frac{h_{i+1,j} - h_{i-1,j}}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \right]$$

$$\text{DENOM} = \left[ \frac{h_{i+1/2,j}^3 \Delta x_i + h_{i-1/2,j}^3 \Delta x_{i+1}}{1/2 \Delta x_i \Delta x_{i+1} (\Delta x_i + \Delta x_{i+1})} + \frac{h_{i,j+1/2}^3 \Delta z_j + h_{i,j-1/2}^3 \Delta z_{j+1}}{1/2 \Delta z_j \Delta z_{j+1} (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})} \right]$$

#### 3.1.4 - Solução do Sistema Linear Resultante

A equação (3.9) representa um sistema de equações algébricas. Para resolver este sistema, existem, basicamente, dois métodos: diretos e iterativos. Os métodos diretos possuem a vantagem de sempre encontrarem a solução de um sistema determinado (salvo casos de mau condicionamento) porém não são indicados para sistemas esparsos de grande porte (caso em questão). Contudo, devido à condição de contorno de Reynolds (equação 3.3), mesmo os métodos diretos teriam que ser aplicados várias vezes para encontrarem a solução do sistema. Os métodos iterativos por sua vez exigem que a matriz do sistema possua certas características (12) para que haja convergência.

O método aqui adotado foi o método da relaxação (12). Neste método, constroem-se uma sequência de aproximações da solução do sistema. O valor da  $k$ -ésima iteração é dado por

$$P_{i,j}^{(k+1)} = P_{i,j}^{(k)} + \beta \left[ P_{i,j}^* - P_{i,j}^{(k)} \right] \quad (3.10)$$

onde:

$$P_{i,j}^* = (C_e P_{i-1,j}^{(k+1)} + C_d P_{i+1-j}^{(k+1)} + C_i P_{i,j-1}^{(k+1)} + C_s P_{i,j+1}^{(k+1)} + C_c) / \text{DENOM}$$

$\beta$  é chamado coeficiente de relaxação. Três casos distintos ocorrem:

$0 < \beta < 1$	-----	Sub-relaxação
$\beta = 1$	-----	Gauss-Seidel
$1 < \beta < 2$	-----	Sobre-Relaxação ("SOR")

O valor de  $\beta$  está relacionado com a velocidade de convergência do método. Para cada sistema positivo definido e determinado é sempre possível encontrar um valor ótimo para  $\beta$ , ou seja, um coeficiente que proporcione a maior velocidade de convergência possível (12). Contudo, estes métodos são trabalhosos do ponto de vista computacional e é mais interessante, do ponto de vista prático, adotar um valor fixo para  $\beta$ , valor este na vizinhança do valor ótimo.

O sistema algébrico, dado pela equação (3.9), pode ser representado por

$$\hat{A} \vec{p} = \vec{b} \quad (3.10a)$$

onde  $\tilde{A}$  é a matriz dos coeficientes,  $\vec{p}$  é o vetor incógnita (pressão) e  $\vec{b}$  o lado direito da equação.

O valor ótimo do fator de relaxação ( $\beta$ ) depende somente dos valores dos coeficientes da matriz  $\tilde{A}$  (9) e é independente de  $\vec{b}$ . É fácil verificar que, se dividirmos os dois lados da  $i$ -ésima linha do sistema dado pela equação (3.10a) por  $h_{i,j}^3$ , a matriz  $\tilde{A}$  ficará praticamente independente de  $h_{i,j}$ , uma vez que

$$\frac{h_{i+1/2,j}^3}{h_{i,j}^3} = \frac{h_{i-1/2,j}^3}{h_{i,j}^3} = \frac{h_{i,j+1/2}^3}{h_{i,j}^3} = \frac{h_{i,j-1/2}^3}{h_{i,j}^3} = 1$$

Assim sendo, conclui-se que a matriz  $\tilde{A}$  e, conseqüentemente, o fator ótimo de relaxação não são funções de  $h$ . Desta maneira, conclui-se que o fator ótimo de relaxação é independente de  $\epsilon$  e é função somente das seguintes variáveis:

$$\Delta X_i, \Delta X_{i+1}, \Delta Z_j, \Delta Z_{j+1}$$

ou seja,

$$\beta = \beta(L/D, I, J)$$

onde  $L$  = largura do mancal (m)  
 $D$  = diâmetro do mancal (m)  
 $I$  = número de sub-divisões do eixo  $x$   
 $J$  = número de sub-divisões do eixo  $z$

Para a determinação do valor ótimo de  $\beta$ , considerou-se combinações das variáveis acima mencionadas. Normalmente, para a simulação das características operacionais de mancais de motores de combustão interna, as variáveis acima mencionadas situam-se dentro da seguinte faixa :

$$0,2 < L/D < 1,0$$

$$20 < I < 40$$

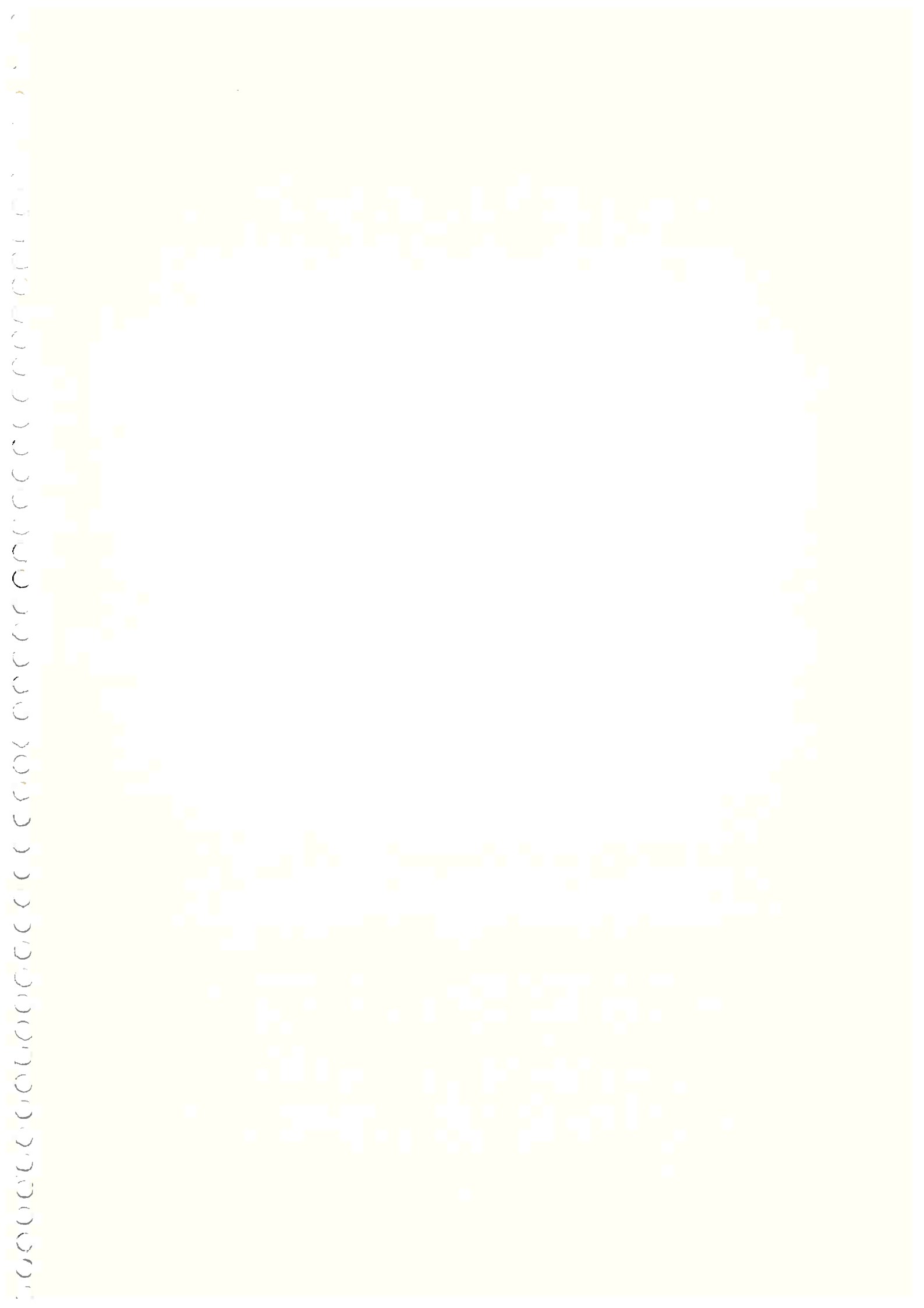
$$10 < J < 40$$

O programa foi rodado para diversas combinações das variáveis dependentes acima mencionadas e os números de iterações necessários para a convergência ( $\delta = 0,001$ ), para dois valores extremos de L/D, estão tabelados a seguir.

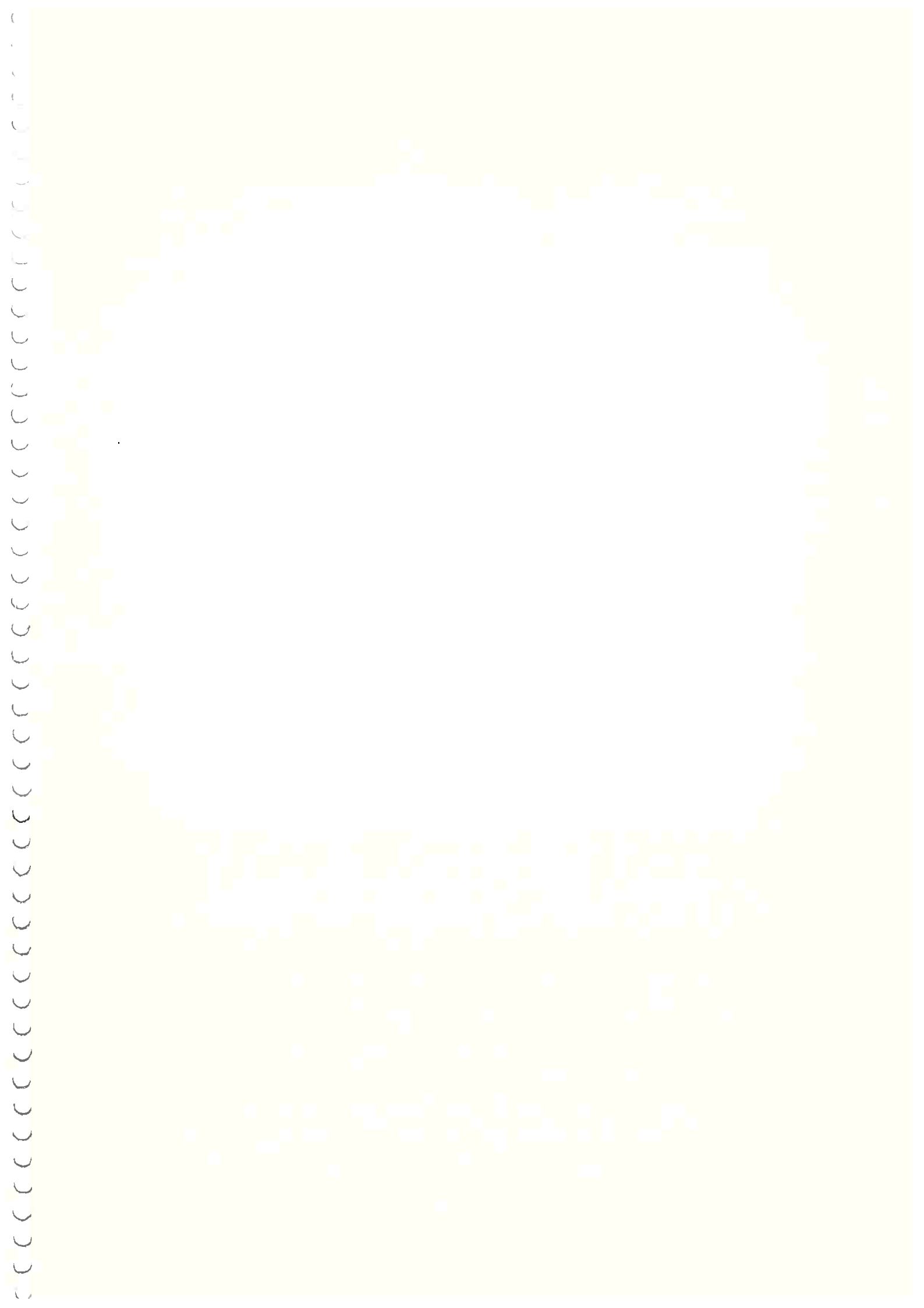
Coeficiente de Relaxação	Refinamento da Malha					
	Número de Sub-divisões do Eixo x			Número de Sub-divisões do Eixo z		
beta	20x10	20x20	30x15	40x20	30x30	40x40
1,65	35	-	-	-	-	-
1,70	28	-	63	-	-	-
1,75	(26)	85	52	86	-	-
1,80	33	68	(39)	69	133	-
1,85	44	(49)	42	(50)	104	162
1,90	-	60	63	60	(69)	117
1,95	-	126	-	136	119	(101)

Fig. 3.5a - Número de Iterações necessário para Convergência  
para L/D = 0,2









Coeficiente de Relaxação	Refinamento da Malha					
	Número de Sub-divisões do Eixo x			Número de Sub-divisões do Eixo z		
beta	20x10	20x20	30x15	40x20	30x30	40x40
1,55	38	-	-	-	-	-
1,60	32	-	-	-	-	-
1,65	(27)	-	62	-	-	-
1,70	(27)	80	52	92	-	-
1,75	33	66	(41)	74	135	-
1,80	43	(50)	46	(57)	110	209
1,85	-	51	62	65	(82)	154
1,90	-	79	-	102	83	(109)
1,95	-	-	-	-	153	223

Fig. 3.5b - Número de Iterações necessário para Convergência  
para  $L/D = 1,0$

Os valores entre parênteses referem-se ao número mínimo de iterações. Como se pode observar, o valor ótimo de  $\beta$  não varia muito em função de  $L/D$ , mas é bastante sensível à discretização da malha. O valor ótimo de  $\beta$  é calculado, para cada caso, em função da discretização adotada.

### 3.1.5 - Cálculo da Força Hidrodinâmica

A força hidrodinâmica, gerada pelo campo de pressão, pode ser decomposta em um componente radial e um componente tangencial com relação à linha de centros,

$$\vec{F} = F_R \hat{R} + F_t \hat{T} \quad (3.11)$$

onde  $\hat{R}$  e  $\hat{T}$  são versores ao longo e perpendicular à linha de centros, respectivamente, conforme esquematizado na figura (3.6).

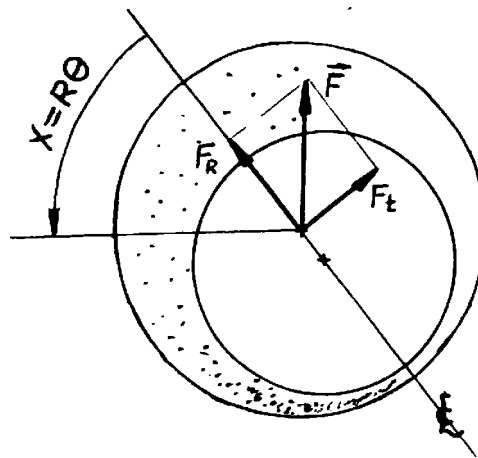


Fig. 3.6 - Componentes da Força Hidrodinâmica

As forças radiais e tangenciais podem ser calculadas por

$$F_R = - \int_{z=0}^L \int_{x=0}^{2TR} ( p(x,z) \cos(\theta) ) dx dz \quad (3.12)$$

$$F_t = \int_{z=0}^L \int_{x=0}^{2RR} ( p(x,z) \sen(\theta) ) dx dz \quad (3.13)$$

No caso discreto, as integrais acima podem ser calculadas através de somatórias:

$$F_R = - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{i,j} \cos(X_i/R) \Delta X_i \Delta Z_j \quad (3.14)$$

$$F_t = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{i,j} \sin(X_i/R) \Delta X_i \Delta Z_j \quad (3.15)$$

A força hidrodinâmica é dada por:

$$F = \sqrt{F_R^2 + F_t^2} \quad (3.16)$$

O ângulo entre a força hidrodinâmica e a linha de centros é dado por:

$$\phi = \tan^{-1} (F_t/F_R) \quad (3.17)$$

### 3.1.6 - Cálculo da Vazão do Oleo Lubrificante

A velocidade do fluido lubrificante, no sentido axial, foi deduzida anteriormente e é dada por:

$$w(y) = \frac{1}{2\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right) [y(y-h)] \quad (3.18)$$

A vazão mássica que escoar no sentido axial é dada por:

$$\dot{m} = \int_{x=0}^{2\pi R} \int_{y=0}^{h(x)} \rho w(y) dx dy \quad (3.19)$$

onde:

$\dot{m}$  = vazão mássica (kg/s)

$\rho$  = densidade do fluido lubrificante (kg/m<sup>3</sup>)

Substituindo pela expressão (3.18) em (3.19), tem-se:

$$\dot{m} = \frac{\rho}{2\mu} \int_{x=0}^{2\pi R} \int_{y=0}^{h(x)} \left\{ \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right) [y(h-y)] \right\} dx dy \quad (3.20)$$

Integrando a equação acima com relação à y, tem-se:

$$\dot{m} = \frac{\rho}{12\mu} \int_{x=0}^{2\pi R} \left\{ h^3 \left[ \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right)_{z=0} - \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right)_{z=L} \right] \right\} dx$$

no caso discreto, tem-se:

$$\dot{m} = \frac{\rho}{12\mu} \sum_{i=1}^I \left\{ h_i^3 \left[ \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right)_{z=0} - \left( \frac{\partial P}{\partial z} \right)_{z=L} \right] \Delta X_i \right\} \quad (3.21)$$

Aproximando as derivadas por diferenças finitas, tem-se:

$$\dot{m} = \frac{\rho}{12\mu} \sum_{i=1}^I \left\{ h_i^3 \left[ \left( \frac{P_{i,2} - P_{i,1}}{\Delta Z_2} \right) - \left( \frac{P_{i,J} - P_{i,J-1}}{\Delta Z_J} \right) \right] \Delta X_i \right\} \quad (3.22)$$

que é a expressão utilizada para o cálculo da vazão mássica.

### 3.1.7 - Cálculo do Fator de Excentricidade

Quando uma força é aplicada à um mancal hidrodinâmico, o eixo do mesmo se deslocará a uma posição de excentricidade de equilíbrio. Seja  $W$  a força aplicada e  $F$  a força hidrodinâmica gerada pelo mancal devido à sua excentricidade. Seja  $\epsilon^*$ , o fator de excentricidade, tal que

$$F(\epsilon^*) = W \quad (3.23)$$

A força hidrodinâmica para um fator de excentricidade na vizinhança de  $\epsilon^{(k)}$  pode ser aproximada por uma série de Taylor de primeira ordem:

$$\begin{aligned} F(\epsilon^*) &= F(\epsilon^{(k)} + \Delta\epsilon^{(k+1)}) = \\ &= F(\epsilon^{(k)}) + \left( \frac{\partial F}{\partial \epsilon} \right) \Delta\epsilon^{(k+1)} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Igualando (3.23) e (3.24), tem-se:

$$\Delta\epsilon^{(k+1)} = \left[ \frac{W - F(\epsilon^{(k)})}{\left( \frac{\partial F}{\partial \epsilon} \right)} \right] \quad (3.25)$$

A derivada da equação anterior pode ser aproximada por

$$\frac{\partial F}{\partial \epsilon} \approx \frac{F(\epsilon^{(k)}) - F(\epsilon^{(k-1)})}{\Delta\epsilon^{(k-1)}}$$

Substituindo pela expressão acima em (3.25), tem-se:

$$\Delta\epsilon^{(k+1)} = \frac{\Delta\epsilon^{(k-1)} [W - F(\epsilon^{(k)})]}{F(\epsilon^{(k)}) - F(\epsilon^{(k-1)})} \quad (3.26)$$



A equação (3.26) é resolvida sucessivamente até que

$$\frac{|w - F(\varepsilon^{(k)})|}{|w|} < \delta \quad (3.27)$$

onde  $\delta$  é um valor dado inversamente proporcional à precisão desejada.

### 3.1.8 - Cálculo da Potência de Atrito

A velocidade  $u(y)$  foi deduzida no capítulo 2 e é dada por

$$u(y) = \frac{1}{2\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right) [y(y-h)] + \left( \frac{y}{h} \right) U_2 \quad (3.28)$$

A tensão de cisalhamento é dada por

$$\begin{aligned} \tau &= \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=h} = \\ &= \frac{h}{2} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \mu \left( \frac{U_2}{h} \right) \end{aligned}$$

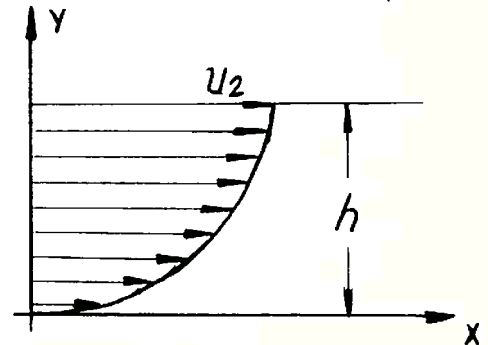


Fig. 3.7 - Distribuição da Velocidade  $u(y)$

A força de atrito é dada por

$$\begin{aligned} F_1 &= \int_{x=0}^{2\pi R} \int_{z=0}^L \tau \, dx dy = \\ &= L \int_{x=0}^{2\pi R} \left( \frac{h}{2} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \mu \left( \frac{U_2}{h} \right) \right) dx \quad (3.29) \end{aligned}$$

A potência de atrito é dada por

$$\dot{W} = F_{\tau} \cdot U_2 \quad (3.30)$$

onde  $\bar{U}_2$  é a velocidade tangencial do eixo. Substituindo por  $F_{\tau}$  da equação (3.29) e usando aproximação de diferenças finitas para derivada, tem-se a fórmula para o cálculo da potência de atrito.

$$\dot{W} = LU_2 \sum_{i=1}^I \left\{ \left[ \frac{h_i}{2} \left( \frac{P_{i+1,j} - P_{i-1,j}}{\Delta X_i + \Delta X_{i+1}} \right) + \left( \frac{\mu U_2}{h_i} \right) \right] \Delta X_i \right\} \quad (3.31)$$

### 3.1.9 - Cálculo da Viscosidade do Fluido

No equacionamento proposto até agora, a viscosidade foi considerada constante. Porém, é possível, através de um processo iterativo, calcular um valor de viscosidade, levando-se em consideração a temperatura de entrada do óleo lubrificante e a potência de atrito.

A viscosidade de um fluido lubrificante varia exponencialmente com a temperatura. Portanto, pequenas variações na temperatura podem acarretar grandes alterações na sua viscosidade, e, conseqüentemente, na capacidade de carga do mancal. Para que não sejam introduzidos erros significativos no cálculo dos itens anteriores, é necessário que se calcule o valor da viscosidade do fluido lubrificante.

A variação uniforme ("bulk") de temperatura do fluido lubrificante é dada por

$$\dot{m}_{CAT} = \dot{W} \quad (3.32)$$

onde:

$\dot{m}$  = vazão mássica do fluido lubrificante (Kg/s)

$C$  = calor específico do fluido lubrificante (J/Kg - °C)

$\Delta T$  = variação de temperatura do fluido lubrificante (°C)

$\dot{W}$  = calor gerado por dissipação viscosa (W)

Isolando  $\Delta T$  da equação (3.32), tem-se:

$$\Delta T = \frac{\dot{W}}{\dot{m}C} \quad (3.33)$$

A solução correta do problema em questão seria a solução da equação de conservação da energia na sua totalidade, inclusive o calor transferido para o alojamento por condução. Porém, este enfoque é bastante complexo e foge do escopo deste estudo. Num motor de combustão, a quantidade de calor gerado por atrito que é transferido para o fluido lubrificante é da ordem de 80% (19). Assim sendo, pode-se calcular, aproximadamente, a temperatura média de saída do fluido.

$$T_s = T_e + 0,8 \frac{\dot{W}}{\dot{m}C} \quad (3.34)$$

Internamente ao programa, existem valores tabelados de viscosidade de óleo (SAE 10 até SAE 70), variando com a temperatura de 10 em 10 graus.

Assume-se que a temperatura de funcionamento do fluido é dada pela média aritmética entre a temperatura de entrada e a de saída.

$$T_{\text{oleo}}^* = \frac{T_e + T_s}{2} \quad (3.35)$$

A equação (3.34) mostra que  $T_s$  é função de  $w$  e  $m$ , que por sua vez, são funções da viscosidade  $e$ , conseqüentemente, da temperatura. É possível calcular uma sequência de temperaturas através da fórmula

$$T_{\text{oleo}}^{(k+1)} = T_{\text{oleo}}^{(k)} + \gamma [T_{\text{oleo}}^* - T_{\text{oleo}}^{(k)}] \quad (3.36)$$

onde  $\gamma$  é um fator de sub-relaxação para assegurar a convergência do processo iterativo. Este valor foi determinado empiricamente e é função da temperatura de entrada e do tipo de óleo (seu valor varia entre 0,1 e 0,3).

O método converge quando

$$\frac{|T_{\text{oleo}}^{(k+1)} - T_{\text{oleo}}^{(k)}|}{|T_{\text{oleo}}^{(k+1)}|} < \delta \quad (3.37)$$

onde  $\delta$  é um valor de entrada que define o nível de precisão desejada.

### 3.2 - Carregamento Dinâmico

A equação que rege o comportamento de um mancal hidrodinâmico sob condições dinâmicas de carregamento e viscosidade constante é a equação (2.27), reproduzida a seguir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 12\mu R\omega \frac{\partial h}{\partial x} + 12\mu [ \dot{e} \sin(\theta) + e \dot{\theta} \cos(\theta) ] \quad (3.38)$$

Considere a figura 3.8. Se o módulo da carga ( $w$ ) ou seu ângulo de aplicação ( $\psi$ ) variar com o tempo, daí, então, o carregamento é dito dinâmico e o centro do eixo do mancal se movimentará dentro do alojamento.

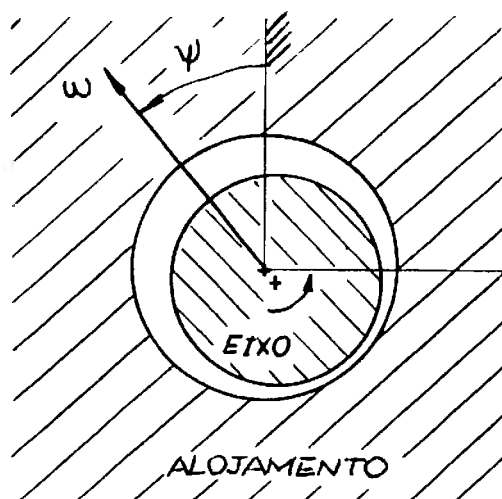


Fig. 3.8 - Carregamento Aplicado a um Mancal

### 3.2.1 - Órbita do Eixo

Quando sujeito a um carregamento dinâmico, o centro do eixo se movimentará dentro do alojamento do mancal e esta trajetória se denomina órbita do eixo do mancal. A visualização desta órbita torna-se evidente, se o conjunto de pontos da trajetória forem desenhados dentro de um círculo, cujo raio é igual à folga radial do mancal, conforme esquematizado na figura 3.9. Cada ponto desta órbita é identificado por um par ordenado  $(\epsilon, \alpha)$ , onde  $\epsilon$  é um adimensional definido pela razão entre o deslocamento do eixo dividido pela folga radial do mancal,  $\alpha$  é o ângulo entre a linha que une o centro do mancal ao ponto da trajetória e a linha vertical.

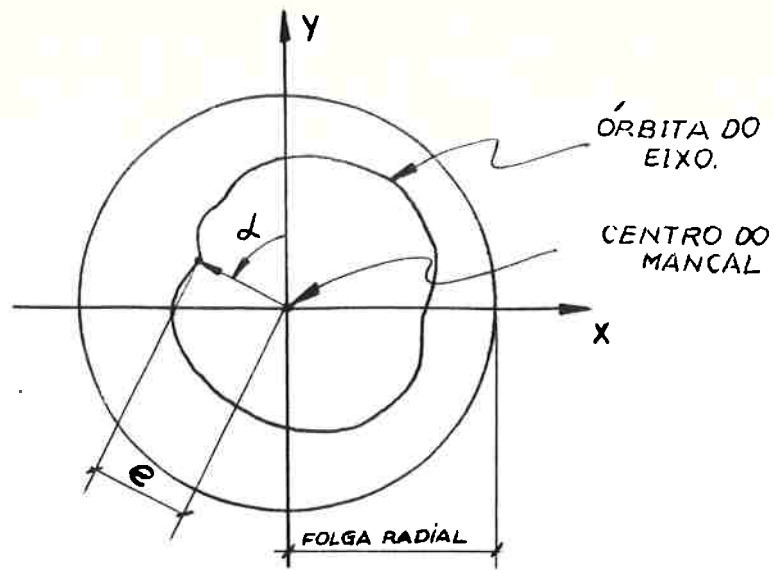


Fig. 3.9 - Órbita do Eixo de um Mancal

### 3.2.2 - Cálculo do Fator de Excentricidade e do Ângulo Alfa

A carga dinâmica aplicada em um mancal pode ser decomposta em:

$$\vec{W}(t) = W_x(t) \hat{i} + W_y(t) \hat{j} \quad (3.39)$$

Analisando a figura 3.10, verifica-se que a expressão anterior pode ser descrita da seguinte forma:

$$\vec{W}(t) = w(t) \{ \cos[\psi(t)] \hat{j} - \sin[\psi(t)] \hat{i} \} \quad (3.40)$$

onde:

•  $\psi(t)$  é o ângulo formado entre o eixo y e o vetor carga aplicada ( $\vec{W}$ )

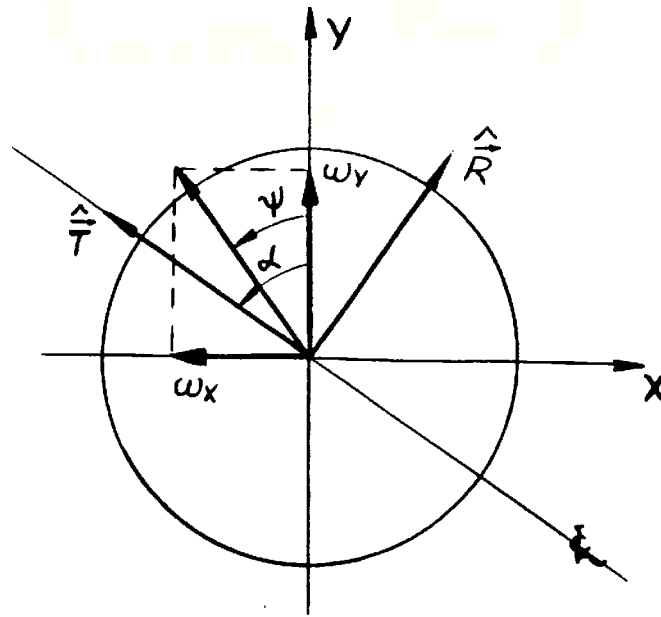


Fig. 3.10 - Decomposição da Carga Aplicada

A força hidrodinâmica calculada a partir da equação de Reynolds é dada por:

$$\vec{F}(t) = F_t(t) \hat{T} + F_r(t) \hat{R} \quad (3.41)$$

O vetor  $\vec{W}$  pode também ser decomposto em um componente tangencial e outro radial, tendo-se:

$$\vec{W}(t) = W_t(t) \hat{T} + W_r(t) \hat{R} \quad (3.42)$$

onde:

$$W_t(t) = W_y(t) \cos[\alpha(t)] + W_x(t) \sin[\alpha(t)] \quad (3.43)$$

$$W_r(t) = W_y(t) \text{ Sen} [\alpha(t)] - W_x(t) \text{ Cos} [\alpha(t)] \quad (3.44)$$

Para que ocorra o equilíbrio de forças, as seguintes condições devem ser asseguradas em  $t=t_0$ :

$$W_t(t_0) = - F_t(t_0)$$

$$W_r(t_0) = - F_r(t_0)$$

Para um espaço de tempo  $t=t_0+\Delta t$ , tem-se:

$$W_t(t_0+\Delta t) = - F_t(t_0+\Delta t) \quad (3.45)$$

$$W_r(t_0+\Delta t) = - F_r(t_0+\Delta t) \quad (3.46)$$

Substituindo  $t$  por  $t_0+\Delta t$ , a expressão (3.45) na equação (3.43), obtém-se:

$$\begin{aligned} & W_x(t_0+\Delta t) \text{ Cos} [\alpha(t_0+\Delta t)] + \\ & + W_y(t_0+\Delta t) \text{ Sen} [\alpha(t_0+\Delta t)] = - F_t(t_0+\Delta t) \end{aligned} \quad (3.47)$$

Se o incremento de tempo é pequeno, a seguinte aproximação é válida:

$$F_t(t_0+\Delta t) \approx F_t(t_0) + \frac{\partial F_t}{\partial \epsilon} \Delta \epsilon + \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\epsilon}} \Delta \dot{\epsilon} + \frac{\partial F_t}{\partial \ddot{\alpha}} \Delta \ddot{\alpha} \quad (3.48)$$



Sabe-se, ainda, que:

$$\alpha(t_0 + \Delta t) = \alpha_0 + \Delta\alpha = \alpha_0 + \dot{\alpha}\Delta t$$

$$\cos[\alpha(t_0 + \Delta t)] = \cos(\alpha_0)\cos(\Delta\alpha) - \sin(\alpha_0)\sin(\Delta\alpha) \quad (3.49)$$

$$\sin[\alpha(t_0 + \Delta t)] = \sin(\alpha_0)\cos(\Delta\alpha) + \sin(\Delta\alpha)\cos(\alpha_0) \quad (3.50)$$

Substituindo as expressões (3.48 a 3.50) na equação (3.47), tem-se:

$$\begin{aligned} & W(t_0 + \Delta t) \left[ \cos(\alpha_0)\cos(\Delta\alpha) - \sin(\alpha_0)\sin(\Delta\alpha) \right] + \\ & W(t_0 + \Delta t) \left[ \sin(\alpha_0)\cos(\Delta\alpha) + \sin(\Delta\alpha)\cos(\alpha_0) \right] = \\ & - \left[ F_{t_0} + \frac{\partial F_t}{\partial \epsilon} \Delta\epsilon + \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\epsilon}} \Delta\dot{\epsilon} + \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\alpha}} \Delta\dot{\alpha} \right] \end{aligned} \quad (3.51)$$

O incremento em  $\dot{\epsilon}$  e  $\dot{\alpha}$  é dado por:

$$\Delta\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^{(n+1)} - \dot{\epsilon}^{(n)} = \frac{\epsilon^{(n+1)} - \epsilon^{(n)}}{\Delta t^{(n)}} - \frac{\epsilon^{(n)} - \epsilon^{(n-1)}}{\Delta t^{(n-1)}} \quad (3.52)$$

$$\Delta\dot{\alpha} = \dot{\alpha}^{(n+1)} - \dot{\alpha}^{(n)} = \frac{\alpha^{(n+1)} - \alpha^{(n)}}{\Delta t^{(n)}} - \frac{\alpha^{(n)} - \alpha^{(n-1)}}{\Delta t^{(n-1)}} \quad (3.53)$$

onde:

os índices  $n+1$ ,  $n$ ,  $n-1$  representam os níveis de tempo.

Substituindo as expressões (3.52) e (3.53), no lado direito da equação (3.51), obtém-se:

$$\begin{aligned}
 & - \left\{ F_{t0} + \frac{\partial F_t}{\partial \varepsilon} \Delta \varepsilon + \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\varepsilon}} \left[ \frac{\varepsilon^{(n+1)} - \varepsilon^{(n)}}{\Delta t^{(n)}} - \frac{\varepsilon^{(n)} - \varepsilon^{(n-1)}}{\Delta t^{(n-1)}} \right] + \right. \\
 & + \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\alpha}} \left[ \frac{\alpha^{(n+1)} - \alpha^{(n)}}{\Delta t^{(n)}} - \frac{\alpha^{(n)} - \alpha^{(n-1)}}{\Delta t^{(n-1)}} \right] \left. \right\} = - \left\{ F_{t0} + \right. \\
 & + \Delta \varepsilon \left[ \frac{\partial F_t}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{\Delta t^{(n)}} \cdot \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\varepsilon}} \right] + \Delta \alpha \left[ \frac{1}{\Delta t^{(n)}} \cdot \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\alpha}} \right] - \\
 & - \left[ \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\varepsilon}} \dot{\varepsilon}^{(n)} + \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\alpha}} \dot{\alpha}^{(n)} \right]
 \end{aligned}$$

A expressão (3.51) passa a ser:

$$\begin{aligned}
 & W_x(t_0 + \Delta t) [\cos(\alpha_0) \cos(\Delta \alpha) - \sin(\alpha_0) \sin(\Delta \alpha)] + \\
 & + W_y(t_0 + \Delta t) [\sin(\alpha_0) \cos(\Delta \alpha) + \sin(\Delta \alpha) \cos(\alpha_0)] = \\
 & = \left\{ - F_{t0} + \Delta \varepsilon \left[ \frac{\partial F_t}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{\Delta t^{(n)}} \cdot \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\varepsilon}} \right] + \Delta \alpha \left[ \frac{1}{\Delta t^{(n)}} \cdot \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\alpha}} \right] + \right. \\
 & - \left. \left[ \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\varepsilon}} \dot{\varepsilon}^{(n)} + \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\alpha}} \dot{\alpha}^{(n)} \right] \right\}
 \end{aligned}$$

Usando a simbologia abaixo,

$$W_x(t_0 + \Delta t) = W_x^{(n+1)} \quad ; \quad W_y(t_0 + \Delta t) = W_y^{(n+1)}$$

na equação acima, tem-se:

$$\begin{aligned}
 & W_x^{(n+1)} [\cos(\alpha_0) \cos(\Delta \alpha) - \sin(\alpha_0) \sin(\Delta \alpha)] + \\
 & + W_y^{(n+1)} [\sin(\alpha_0) \cos(\Delta \alpha) + \sin(\Delta \alpha) \cos(\alpha_0)] = \\
 & = - \left\{ F_{t0} + \Delta \varepsilon \left[ \frac{\partial F_t}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{\Delta t^{(n)}} \frac{F_t}{\partial \dot{\varepsilon}} \right] + \left[ \frac{1}{\Delta t^{(n)}} \frac{F_t}{\partial \dot{\alpha}} \right] - \right. \\
 & - \left. \left[ \frac{F_t}{\partial \dot{\varepsilon}} \dot{\varepsilon}^{(n)} + \frac{F_t}{\partial \dot{\alpha}} \dot{\alpha}^{(n)} \right] \right\} \quad (3.54)
 \end{aligned}$$

Similarmente ao desenvolvimento da expressão (3.54), obtém-se a equação para o equilíbrio de cargas, no sentido radial, dada por:

$$\begin{aligned}
 & W_Y^{(n+1)} [\cos(\alpha_0) \cos(\Delta\alpha) - \sin(\alpha_0) \sin(\Delta\alpha)] - \\
 & - W_X^{(n+1)} [\sin(\alpha_0) \cos(\Delta\alpha) + \sin(\Delta\alpha) \cos(\alpha_0)] = \\
 & = - \{ F_{r0} + \Delta\epsilon \left[ \frac{\partial F_r}{\partial \epsilon} + \frac{1}{\Delta t(n)} \cdot \frac{\partial F_r}{\partial t} \right] + \Delta\alpha \left[ \frac{1}{\Delta t(n)} \cdot \frac{\partial F_r}{\partial \delta} \right] - \\
 & - \left[ \frac{\partial F_r}{\partial t} \quad \dot{\epsilon}(n) + \frac{\partial F_r}{\partial \delta} \quad \alpha(n) \right] \} \quad (3.55)
 \end{aligned}$$

As equações (3.54) e (3.55) formam um sistema de equações não lineares, cujas incógnitas são  $\Delta\epsilon$  e  $\Delta\alpha$ . A solução desse sistema pode ser obtida através da aplicação de métodos iterativos. Neste caso utilizou-se o método Newton-Raphson para sistemas (10). Para aplicá-lo é necessário que as equações (3.54) e (3.55) estejam na forma homogênea. Passando o lado direito das equações (3.54) e (3.55) para o lado esquerdo, obtém-se um sistema de duas equações homogêneas acopladas, cujas incógnitas são  $\Delta\epsilon$  e  $\Delta\alpha$ .

O sistema homogêneo pode ser representado por :

$$\vec{H} = (H_1, H_2)^T = \vec{0}$$

onde  $H_1$  e  $H_2$  são as equações homogêneas desenvolvidas acima. Seja  $Y$  o vetor das incógnitas representado por :

$$\vec{Y} = (\Delta\epsilon, \Delta\alpha)^T$$

Usando Newton-Raphson, obtém-se uma sequência de aproximações lineares dada pela solução do sistema linear abaixo:

$$\left[ \frac{\partial \vec{H}}{\partial \vec{Y}} \right] \Delta \vec{Y}^{(n)} = - \vec{H} [ \vec{Y}^{(n)} ] \quad (3.56)$$

onde:

$$\Delta \vec{Y}^{(n)} = \vec{Y}^{(n+1)} - \vec{Y}^{(n)} \quad (3.57)$$

. (n+1) e (n) são os níveis de iteração

.  $\left[ \frac{\partial \vec{H}}{\partial \vec{Y}} \right]$  é a matriz Jacobiana do sistema

Resolvendo-se o sistema descrito por (3.56), obtém-se valores para  $\Delta \vec{Y}^{(n)}$ . Re-arranjando a expressão (3.57), tem-se:

$$\vec{Y}^{(n+1)} = \vec{Y}^{(n)} + \Delta \vec{Y}^{(n)} \quad (3.58)$$

O método converge quando:

$$\frac{|\vec{Y}^{(n+1)} - \vec{Y}^{(n)}|}{|\vec{Y}^{(n+1)}|} \leq \delta$$

onde  $\delta$  é um valor arbitrário que define o nível de precisão desejada.

### 3.2.3 - Cálculo da Estimativa Inicial para o Método Iterativo de Newton-Raphson

Conforme exposto anteriormente no capítulo 3.2.2, as expressões (3.54) e (3.55) formam um sistema de equações não lineares, cuja solução pode ser obtida através do método de Newton-Raphson. O número de iterações necessárias para convergência depende principalmente da estimativa inicial dado à solução do sistema.

Com intuito de aumentar a velocidade de convergência do método de Newton-Raphson e diminuir a probabilidade de divergência, utiliza-se um artifício para aproximar a estimativa inicial à solução final do sistema.

Esse artifício consiste em linearizar os termos não lineares do sistema original. Dessa forma, obtém-se como resultante, um novo sistema, linear, cuja solução é bastante simples e direta (sem iterações). A solução desse novo sistema dará como resultados, valores para  $\Delta \epsilon$  e  $\Delta \alpha$ , que serão utilizados como estimativa inicial para a solução do sistema não linear.

A linearização é feita a partir das equações (3.49) e (3.50). Para pequenos  $\Delta \alpha$ , tais expressões podem ser aproximadas por:

$$\cos(\alpha_0 + \Delta \alpha) \approx \cos(\alpha_0) - \Delta \alpha \sin(\alpha_0) \quad (3.59)$$

$$\sin(\alpha_0 + \Delta \alpha) \approx \sin(\alpha_0) + \Delta \alpha \cos(\alpha_0) \quad (3.60)$$

Substituindo as expressões (3.59) e (3.60) na equação (3.47) e desenvolvendo a álgebra, obtém-se:

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon \left[ -\frac{\partial F_t}{\partial \epsilon} - \frac{1}{\Delta t^{(n)}} \cdot \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\epsilon}} \right] + \Delta \alpha \left[ -\frac{1}{\Delta t^{(n)}} \cdot \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\alpha}} + \right. \\ \left. + W_x^{(n+1)} \sin(\alpha_0) - W_y^{(n+1)} \cos(\alpha_0) \right] = W_x^{(n+1)} \cos(\alpha_0) + \\ + W_y^{(n+1)} \sin(\alpha_0) - \left[ \frac{\partial F_t}{\partial t} t^{(n)} + \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\alpha}} \dot{\alpha}^{(n)} \right] + F_{t0} \quad (3.61) \end{aligned}$$

Similarmente, para o sentido radial, tem-se:

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon \left[ -\frac{\partial F_r}{\partial r} - \frac{1}{\Delta t(n)} \cdot \frac{\partial F_r}{\partial \dot{r}} \right] + \Delta \alpha \left[ -\frac{1}{\Delta t(n)} \cdot \frac{\partial F_r}{\partial \dot{\alpha}} + \right. \\ \left. + W_x^{(n+1)} \cos(\alpha_0) + W_y^{(n+1)} \sin(\alpha_0) \right] = -W_x^{(n+1)} \sin(\alpha_0) + \\ + W_y^{(n+1)} \cos(\alpha_0) - \left[ \frac{\partial F_r}{\partial \dot{r}} \dot{r}(n) + \frac{\partial F_r}{\partial \dot{\alpha}} \dot{\alpha}(n) \right] + F_{ro} \end{aligned} \quad (3.62)$$

As expressões (3.61) e (3.62) podem ser representadas da seguinte maneira:

$$a_{11} \Delta \varepsilon + a_{12} \Delta \alpha = b_1$$

$$a_{21} \Delta \varepsilon + a_{22} \Delta \alpha = b_2$$

onde:

$$a_{11} = - \left[ \frac{\partial F_t}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{\Delta t(n)} \cdot \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\varepsilon}} \right]$$

$$a_{12} = \left[ -\frac{1}{\Delta t(n)} \cdot \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\alpha}} + W_x^{(n+1)} \sin(\alpha_0) - W_y^{(n+1)} \cos(\alpha_0) \right]$$

$$a_{21} = - \left[ \frac{\partial F_r}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{\Delta t(n)} \cdot \frac{\partial F_r}{\partial \dot{\varepsilon}} \right]$$

$$a_{22} = \left[ -\frac{1}{\Delta t(n)} \cdot \frac{\partial F_r}{\partial \dot{\alpha}} + W_x^{(n+1)} \cos(\alpha_0) + W_y^{(n+1)} \sin(\alpha_0) \right]$$

$$b_1 = \left[ W_x^{(n+1)} \cos(\alpha_0) + W_y^{(n+1)} \sin(\alpha_0) - \frac{\partial F_t}{\partial \dot{r}} \dot{r}(n) - \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\alpha}} \dot{\alpha}(n) + F_{to} \right]$$

$$b_2 = \left[ -W_x^{(n+1)} \sin(\alpha_0) + W_y^{(n+1)} \cos(\alpha_0) - \frac{\partial F_r}{\partial \dot{r}} \dot{r}(n) - \frac{\partial F_r}{\partial \dot{\alpha}} \dot{\alpha}(n) + F_{ro} \right]$$

A solução desse sistema fornecerá valores para  $\Delta\epsilon$  e  $\Delta\alpha$ , que serão utilizados como estimativa inicial para a solução do sistema não linear.

### 3.2.4 - Cálculo das Derivadas da Força Hidrodinâmica

Nos capítulos anteriores, a força hidrodinâmica na vizinhança de  $t=t_0$  foi aproximada através de uma série de Taylor de primeira ordem, da seguinte maneira:

$$F_t(t_0+\Delta t) = F_t(t_0) + \frac{\partial F_t}{\partial \epsilon} \Delta\epsilon + \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\epsilon}} \Delta\dot{\epsilon} + \frac{\partial F_t}{\partial \dot{\alpha}} \Delta\dot{\alpha}$$

$$F_r(t_0+\Delta t) = F_r(t_0) + \frac{\partial F_r}{\partial \epsilon} \Delta\epsilon + \frac{\partial F_r}{\partial \dot{\epsilon}} \Delta\dot{\epsilon} + \frac{\partial F_r}{\partial \dot{\alpha}} \Delta\dot{\alpha}$$

Os valores das derivadas das equações acima não são conhecidos a priori e devem ser calculados numericamente.

O cálculo das derivadas é feito da seguinte maneira: para um determinado conjunto de valores de  $\Delta\epsilon$ ,  $\Delta\dot{\epsilon}$  e  $\Delta\dot{\alpha}$ , pode-se calcular o valor da força hidrodinâmica:

$$F_{t_0} = F_t(\epsilon_0, \dot{\epsilon}_0, \dot{\alpha}_0) \quad (3.63)$$

$$F_{r_0} = F_r(\epsilon_0, \dot{\epsilon}_0, \dot{\alpha}_0) \quad (3.64)$$

a seguir, dá-se uma pequena perturbação em  $\Delta\epsilon$  e calcula-se o valor da nova força hidrodinâmica:

$$F_t = F_t(\epsilon_0 + \Delta\epsilon, \dot{\epsilon}_0, \dot{\alpha}_0) \quad (3.65)$$

$$F_r = F_r(\epsilon_0 + \Delta\epsilon, \dot{\epsilon}_0, \dot{\alpha}_0) \quad (3.66)$$

O valor numérico das derivadas da força hidrodinâmica com relação a  $\epsilon$  pode, então, ser aproximado por:

$$\frac{\partial F_t}{\partial \epsilon} \approx \frac{F_t(\epsilon_0 + \Delta\epsilon, \dot{\epsilon}_0, \dot{\alpha}_0) - F_t(\epsilon_0, \dot{\epsilon}_0, \dot{\alpha}_0)}{\Delta\epsilon} \quad (3.67)$$

$$\frac{\partial F_r}{\partial \epsilon} \approx \frac{F_r(\epsilon_0 + \Delta\epsilon, \dot{\epsilon}_0, \dot{\alpha}_0) - F_r(\epsilon_0, \dot{\epsilon}_0, \dot{\alpha}_0)}{\Delta\epsilon} \quad (3.68)$$

Analogamente, obtém-se expressões para as outras derivadas

$$\frac{\partial F_t}{\partial \dot{\epsilon}} \approx \frac{F_t(\epsilon_0, \dot{\epsilon}_0 + \Delta\dot{\epsilon}, \dot{\alpha}) - F_t(\epsilon_0, \dot{\epsilon}_0, \dot{\alpha}_0)}{\Delta\dot{\epsilon}} \quad (3.69)$$

$$\frac{\partial F_r}{\partial \dot{\epsilon}} \approx \frac{F_r(\epsilon_0, \dot{\epsilon}_0 + \Delta\dot{\epsilon}, \dot{\alpha}) - F_r(\epsilon_0, \dot{\epsilon}_0, \dot{\alpha}_0)}{\Delta\dot{\epsilon}} \quad (3.70)$$

$$\frac{\partial F_t}{\partial \dot{\alpha}} \approx \frac{F_t(\epsilon_0, \dot{\epsilon}_0, \dot{\alpha}_0 + \Delta\dot{\alpha}) - F_t(\epsilon_0, \dot{\epsilon}_0, \dot{\alpha}_0)}{\Delta\dot{\alpha}} \quad (3.71)$$

$$\frac{\partial F_r}{\partial \dot{\alpha}} \approx \frac{F_r(\epsilon_0, \dot{\epsilon}_0, \dot{\alpha}_0 + \Delta\dot{\alpha}) - F_r(\epsilon_0, \dot{\epsilon}_0, \dot{\alpha}_0)}{\Delta\dot{\alpha}} \quad (3.72)$$

O valor da perturbação é dado por:

$$\Delta\epsilon = \epsilon_0(1 + \delta)$$



onde  $\delta$  é  $10,0^{(q/2)}$  e  $q$  é o número de casas decimais disponíveis no computador. No caso em questão, usou-se um VAX 11/780 com 16 casas decimais (precisão dupla) e, neste caso,

$$|\delta| = 10,0^{-8}$$

Um fator de importância crucial é o sinal da perturbação. O campo de pressão que gera a força hidrodinâmica possui discontinuidades na primeira derivada, devido à condição de contorno de Reynolds (equação 3.3). Num determinado ponto  $(\zeta_0, \alpha_0)$ , as derivadas, à esquerda e à direita de  $\zeta_0$ , podem ter valores completamente diferentes, devido à discontinuidade da derivada do campo de pressão; o mesmo acontece com derivadas em relação a  $\alpha$ .

Seja  $F_t(t_0 + \Delta t)$ , a força hidrodinâmica tangencial que se deseja obter, a partir de uma força hidrodinâmica tangencial  $F(t_0)$ . Considere a figura 3.11

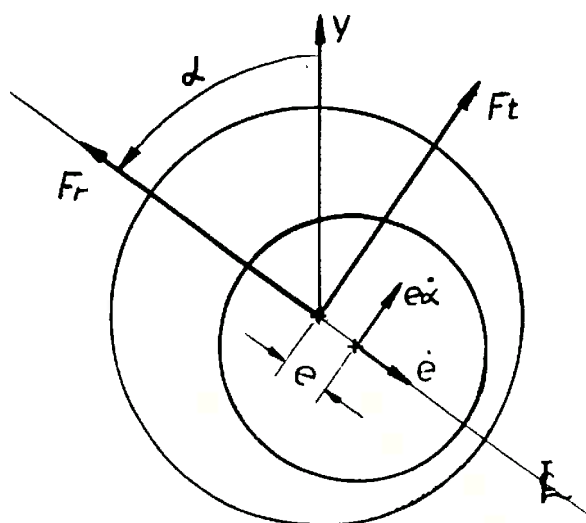


Fig. 3.11 - Força Hidrodinâmica Devido à Movimentos do Centro do Eixo

É fácil verificar que alterações positivas em  $\alpha$  modificarão negativamente o valor de  $F_t$ . O mesmo tipo de análise pode ser feito com relação à força hidrodinâmica radial. Seguindo esta análise, chega-se ao seguinte resultado:

Grandeza relativa entre Forças Hidrodinâmicas	Sinal da Perturbação		
	$\epsilon$	$\dot{\epsilon}$	$\dot{\alpha}$
$F(t_0 + \Delta t) > F(t_0)$	x	x	-
$F(t_0 + \Delta t) < F(t_0)$	x	x	+
$F(t_0 + \Delta t) > F(t_0)$	+	+	x
$F(t_0 + \Delta t) < F(t_0)$	-	-	x

A letra x, na tabela acima, significa que o sinal da perturbação depende do sinal da outra variável e não pode ser determinado a priori.

A inclusão do cálculo do sinal da perturbação aumenta consideravelmente a eficiência do cálculo. Uma estimativa feita mostrou que a não inclusão do sinal da perturbação implica no dobro do tempo de processamento ("CPU") utilizado para a solução do mesmo problema.

### 3.2.5 - Controle Adaptativo do Incremento Temporal

Num determinado nível de tempo  $n$ , usa-se um incremento temporal  $\Delta t^{(n)}$ . Este valor é variável e muda de acordo com certas regras, que foram desenvolvidas para minimizar a quantidade de cálculo (tempo de CPU) e, ao mesmo tempo, assegurar a precisão da solução.

O primeiro teste feito após cada nível de tempo é o de convergência das forças. O cálculo é dito convergente no primeiro nível, se:

$$\frac{|F_t^{(n+1)} - W_t^{(n+1)}|}{|W_t^{(n+1)}|} < \delta \quad (3.73)$$

$$\frac{|F_r^{(n+1)} - W_r^{(n+1)}|}{|W_r^{(n+1)}|} < \delta \quad (3.74)$$

onde  $\delta$  é um valor pré-estipulado. No programa LOCUS, usa-se  $\delta = 0,02$ .

Se uma das desigualdades (3.73 ou 3.74) não for satisfeita, daí, então, o programa retorna ao nível de tempo anterior e divide o incremento temporal pela metade.

$$\Delta t^{(n)} = 0,5 (\Delta t^{(n)}) \quad (3.75)$$

Com o novo valor de  $\Delta t^{(n)}$ , os cálculos são novamente refeitos e os resultados novamente checados através das equações (3.73) e (3.74).

Se o cálculo for convergente no primeiro nível, daí, então, verifica-se se os incrementos orbitais não são muito grandes. Para tal, verifica-se se

$$\Delta \epsilon \leq \Delta \epsilon_{\max} \quad (3.76)$$

$$\Delta \alpha \leq \Delta \alpha_{\max} \quad (3.77)$$

Se uma das desigualdades acima não for satisfeita, daí, então, o programa retorna ao nível de tempo anterior, divide o incremento temporal pela metade e recomeça o processo de cálculo.

Se o cálculo for convergente no primeiro e segundo níveis, daí, então, testa-se para ver se os incrementos orbitais estão dentro de certos limites aceitáveis. Para poder seguir a dinâmica do processo e obter uma órbita aparentemente contínua, exige-se que  $\Delta\epsilon$  e  $\Delta\alpha$  estejam numa faixa pré-estabelecida.

$$\Delta\epsilon_1 \leq \Delta\epsilon \leq \Delta\epsilon_2 \quad (3.78)$$

$$\Delta\alpha_1 \leq \Delta\alpha \leq \Delta\alpha_2 \quad (3.79)$$

Se ambos os valores  $\Delta\epsilon$  e  $\Delta\alpha$  estiverem abaixo da faixa estipulada acima, daí, então,

$$\Delta t^{(n+1)} = \beta \Delta t^{(n)}$$

onde  $\beta > 1,0$ .

Se um dos valores  $\Delta\epsilon$  ou  $\Delta\alpha$  estiver acima do limite estipulado em (3.78) e (3.79), daí, então,

$$\Delta t^{(n+1)} = \Delta t^{(n)} / \beta$$

No programa LOCUS, os seguintes valores são usados:

$$\beta = 1,25$$

$$\Delta\epsilon_{\max} = 0,1 \quad , \quad \Delta\alpha_{\max} = 0,1 \pi$$

$$\Delta\epsilon_1 = 0,04 \quad , \quad \Delta\epsilon_2 = 0,06$$

$$\Delta\alpha_1 = 0,04 \quad , \quad \Delta\alpha_2 = 0,06 \pi$$

Com esta lógica, consegue-se assegurar a precisão dos resultados e controlar o incremento temporal, de tal maneira a seguir a dinâmica do processo.

#### 4 - DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS

Foram desenvolvidos dois programas na linguagem FORTRAN 77, com o objetivo de viabilizar as soluções numéricas apresentadas no capítulo 3.

Os programas chamam-se MANCAL E LOCUS e referem-se, respectivamente, à programas computacionais que foram desenvolvidos para a simulação de mancais hidrodinâmicos com carregamento estático e dinâmico.

A descrição mais detalhada desses programas encontra - se a seguir.

##### 4.1 - Carregamento Estático - Programa MANCAL

O programa MANCAL simula o comportamento de mancais sob condições reais de operação, com carregamento estático. Foi desenvolvido baseado no equacionamento descrito no capítulo 2, e nas soluções numéricas contidas no capítulo 3.

Os resultados fornecidos por esse equacionamento são quantitativamente mais precisos que outros enfoques comumente utilizados (15), visto que a equação de Reynolds é resolvida na forma bi-dimensional e sem simplificações que prejudiquem a veracidade dos resultados finais.

Os dados necessários para a utilização do programa, assim como os resultados fornecidos, estão esquematizados a seguir:

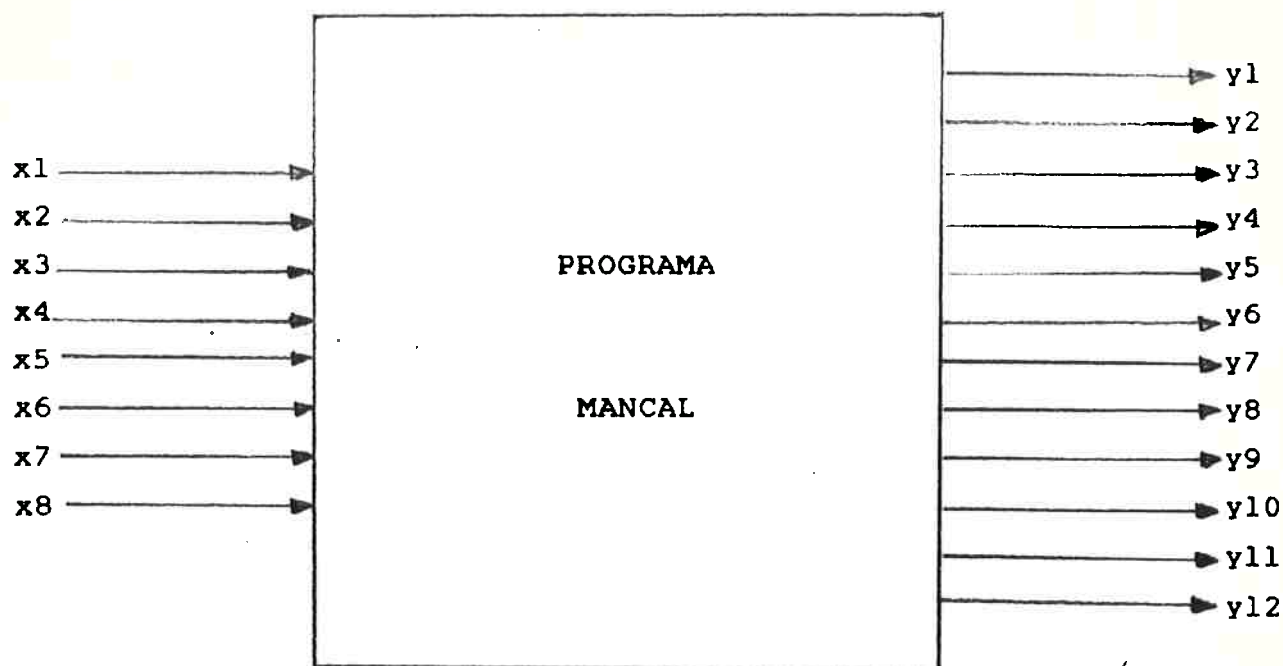
ENTRADASSAÍDAS

Fig. 4.1 - Representação Esquemática do Programa Mancal

onde:

- x1 = Título (máximo 30 caracteres)
- x2 = Carga imposta no mancal (N)
- x3 = Folga diametral (microns)
- x4 = Rotação (rpm)
- x5 = Largura do mancal (mm)
- x6 = Diâmetro do eixo (mm)
- x7 = Temperatura de entrada do óleo ( $^{\circ}$ C)
- x8 = Tipo de óleo (SAE 10 ou 20 ou 30, etc.)

- y1 = Campo de pressão (atm)
- y2 = Fator de excentricidade
- y3 = Espessura mínima do filme (microns)
- y4 = Carga suportada pelo mancal (N)
- y5 = Viscosidade do óleo (mPa-s)
- y6 = Potência dissipada (W)
- y7 = Coeficiente de atrito
- y8 = Ângulo de carga (graus)
- y9 = Número de Sommerfeld
- y10 = Vazão de óleo (l/min)
- y11 = Temperatura de saída do óleo ( $^{\circ}$  C)
- y12 = Pressão máxima do filme de óleo (atm)

A descrição funcional das subrotinas, o diagrama em árvore, o fluxograma de funcionamento e o fluxograma de entradas e saídas do programa MANCAL estão descritos nos sub-ítemos a seguir.

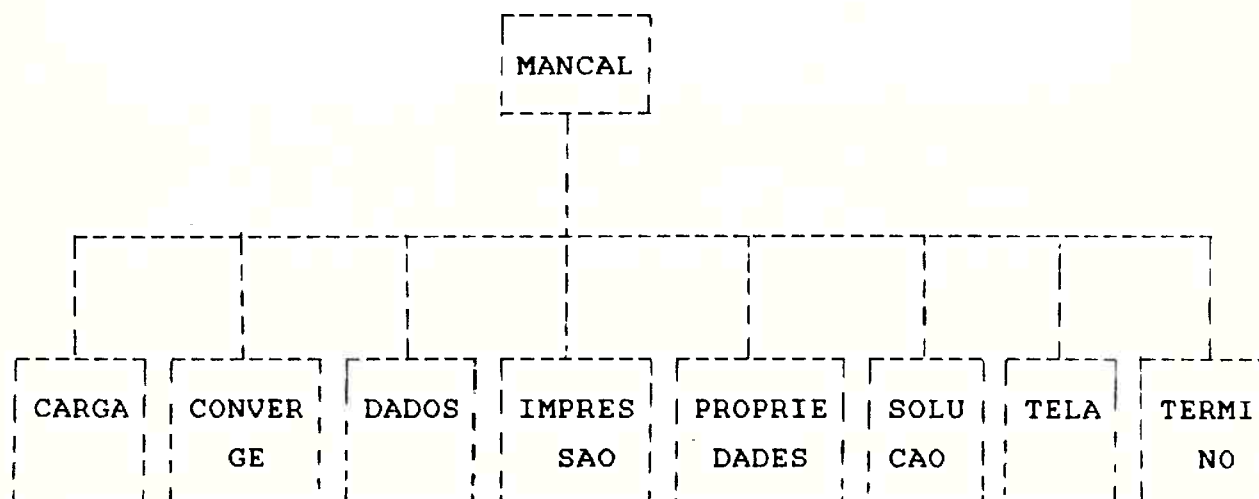
#### 4.1.1 - Descrição Funcional das Subrotinas

SUBROUTINE	FUNCAO
CARGA	Calcula: força hidrodinâmica, vazão de óleo, potência dissipada, coeficiente de atrito, número de Sommerfeld e ângulo de carga
CONVERGE	Testa a convergência do método SOR, na solução do sistema linear, resultante da discretização da equação de Reynolds
DADOS	Solicita ao usuário, os dados do problema a ser simulado (dados de entrada) e inicializa as constantes do programa

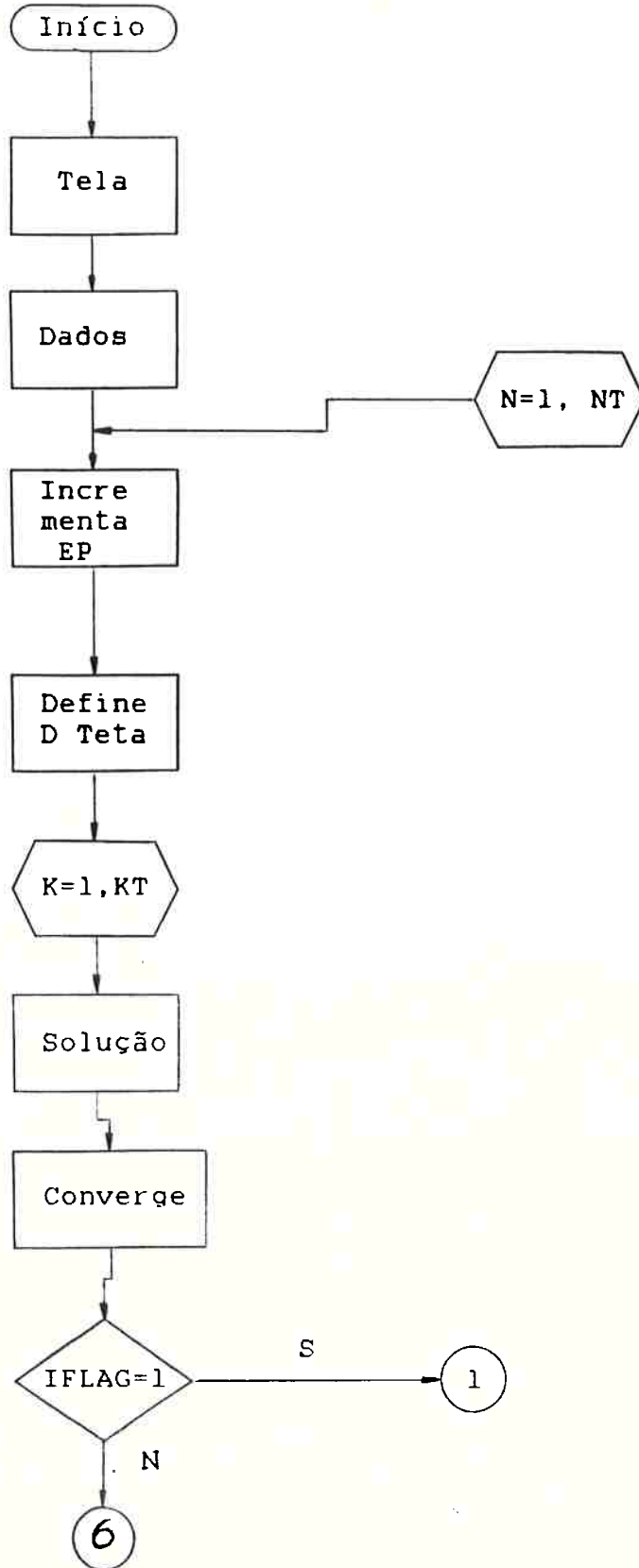


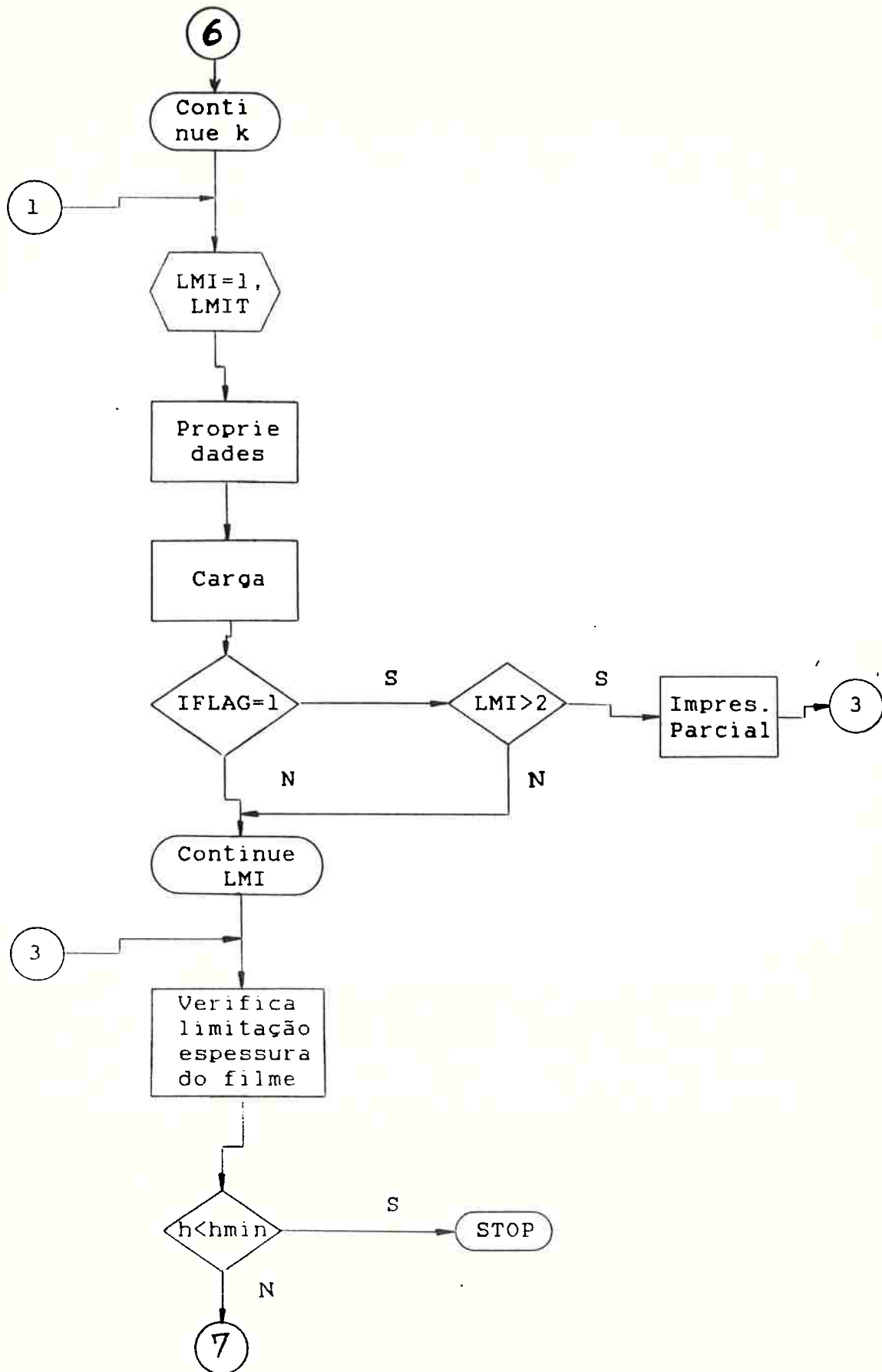
IMPRESSAO	Impressão de resultados
PROPRIE- DADES	Calcula a viscosidade e a temperatura de saída do óleo
SOLUCAO	Resolve o sistema linear, resultante da discretização da equação de Reynolds por diferenças finitas
TELA	Apresenta ao usuário a tela selo do programa MANCAL
TERMINO	Solicita ao usuário, ao término de uma simulação, se deseja terminar a execução do programa, ou iniciar nova simulação

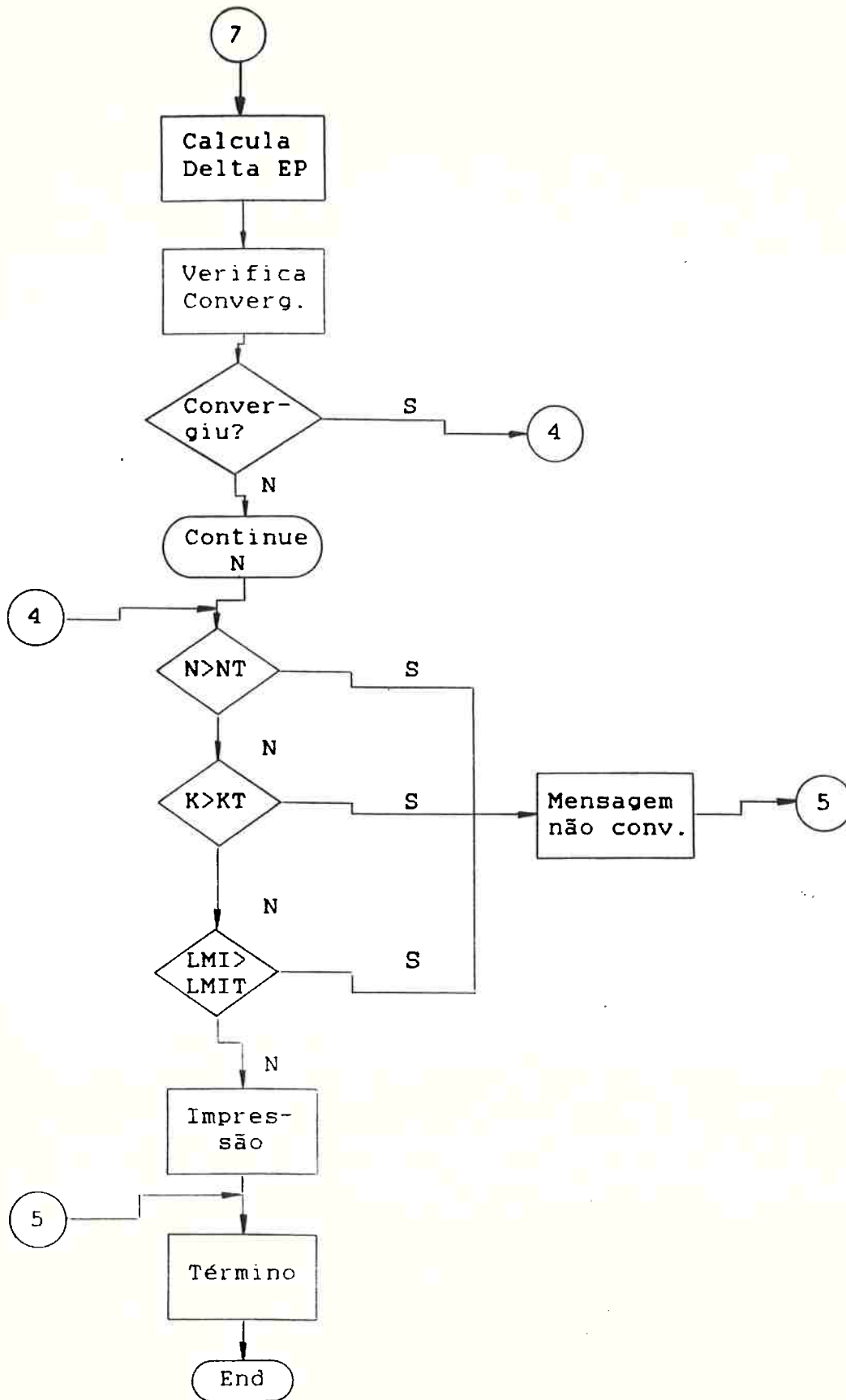
#### 4.1.2 - Diagrama em Arvore



4.1.3 - Fluxograma de Funcionamento

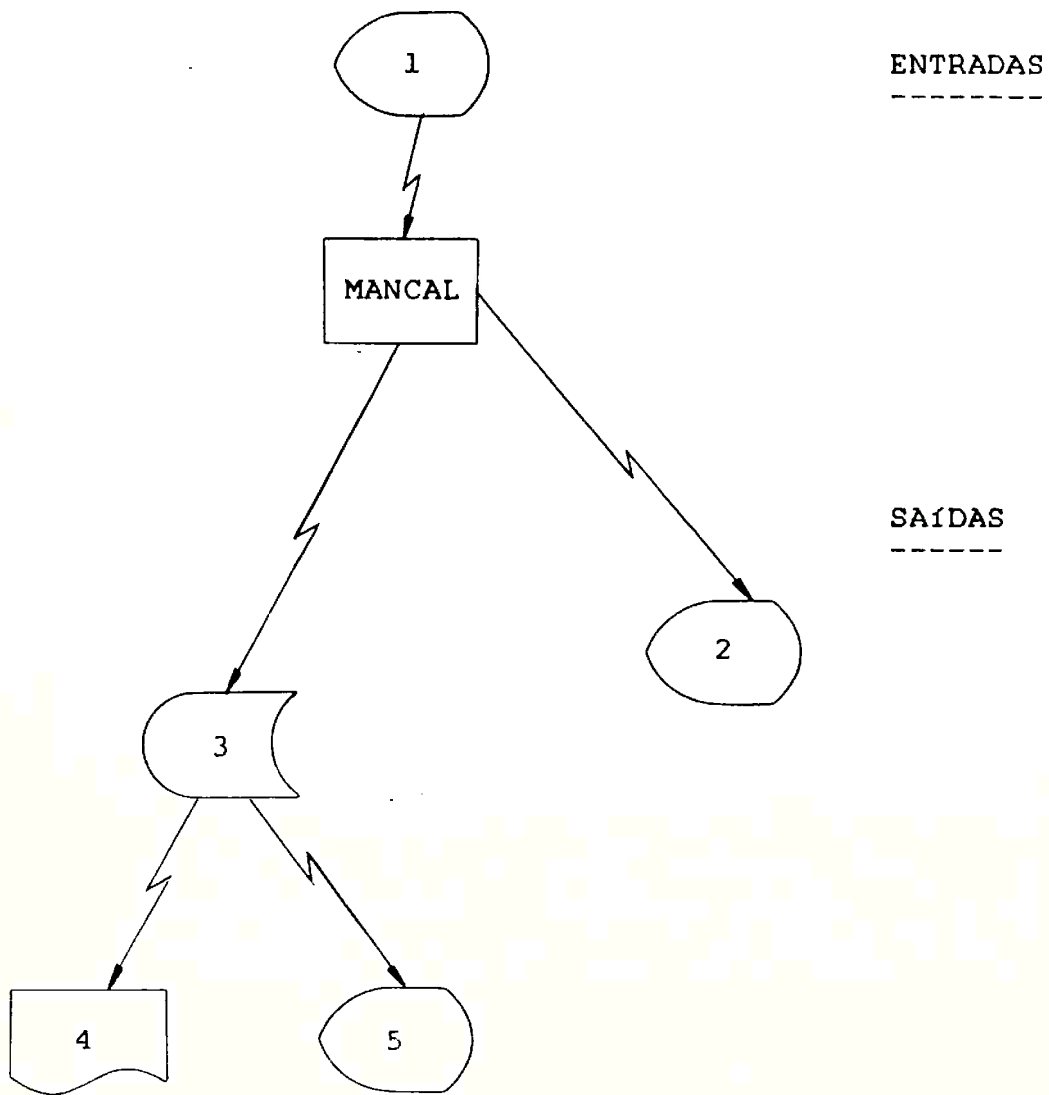






4.1.4 - Fluxograma de Entradas e Saídas de Dados

---



onde:

#### Entradas

- 1 - Representa entradas de dados através do terminal VT52, definindo os parâmetros do problema a ser simulado.

#### Saídas

- 2 - Representa saída total de resultados no terminal VT52.
- 3 - Representa armazenamento em arquivo de nome MANCAL.DAT, de todo o processo de simulação, desde o preenchimento dos dados de entrada até a apresentação total de resultados no terminal VT52.
- 4 - Representa possibilidade de impressão do arquivo MANCAL.DAT, na impressora LPA0.
- 5 - Representa possibilidade de apresentação do arquivo MANCAL.DAT, no terminal VT52.

#### 4.2 - Carregamento Dinâmico - Programa LOCUS

O programa LOCUS simula o comportamento de um mancal hidrodinâmico e a órbita descrita pelo seu eixo, sob condições reais de operação, sujeito a um carregamento dinâmico. O mesmo foi desenvolvido baseado no equacionamento descrito no capítulo 2, e nas soluções numéricas apresentadas no capítulo 3.

O LOCUS pode ser representado esquematicamente da seguinte forma:

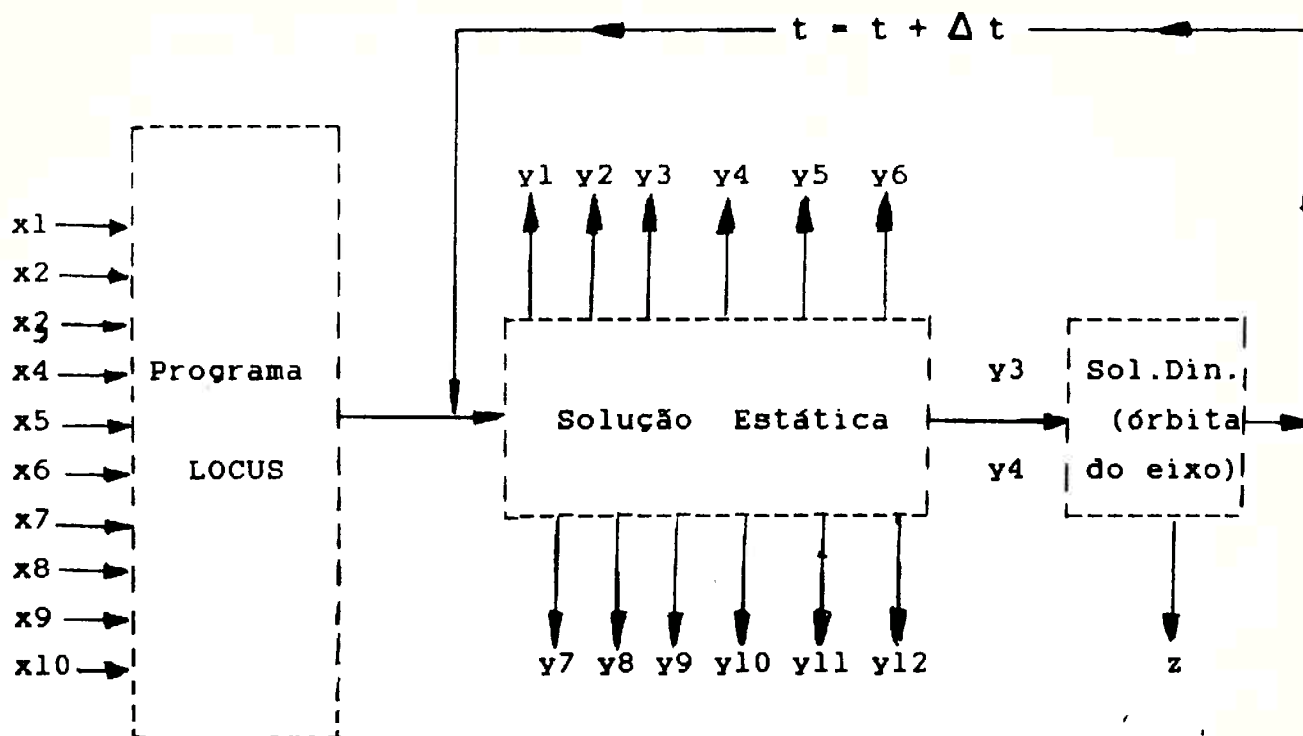
Variáveis de EntradaVariáveis de Saída

Fig. 4.2 Representação Esquemática do Programa LOCUS

Onde:

- x1 = Nome designado ao arquivo, gerado pelo LOCUS, contendo os principais resultados da simulação
- x2 = Título (máximo 50 caracteres)
- x3 = Data da simulação
- x4 = Folga diametral (microns)
- x5 = Rotação do eixo (Rpm)
- x6 = Sentido da rotação (horário ou anti-horário)
- x7 = Largura do mancal (mm)
- x8 = Diâmetro do eixo (mm)
- x9 = Viscosidade do óleo (mPa-s)
- x10 = Cargas impostas e ângulos de aplicação de cargas, no mancal, ao longo do tempo

- y1 = Angulo do girabrequim (graus)
- y2 = Incremento dado ao angulo do girabrequim para a obtenção de y1
- y3 = Fator de excentricidade, para a carga imposta W, no instante t
- y4 = Angulo ( $\alpha$ ) formado entre a ordenada ( eixo Y do mancal ) e a linha de centro, em relação à carga sustentada W, no instante t (graus)
- y5 = Incremento dado à excentricidade, para a obtenção de y3
- y6 = Incremento dado ao angulo  $\alpha$ , para a obtenção de y4
- y7 = Carga imposta W, no instante t (N)
- y8 = Angulo de aplicação ( $\psi$ ) da carga imposta W, medido a partir da ordenada (eixo Y no mancal), no instante t (graus)
- y9 = Carga suportada pelo mancal (força hidrodinâmica) no instante t
- y10 = Angulo ( $\phi$ ) formado entre a ordenada ( eixo Y no mancal ) e a carga suportada, no instante t (graus)
- y11 = Pressão máxima do filme de óleo, no instante t (Atm)
- y12 = Espessura mínima do filme de óleo, no instante t (microns)
  
- z = Orbita do eixo descrita pelo conjunto de pares ordenados (fator de excentricidade, angulo) definidas ao longo do tempo pelas variáveis y3 e y4

A filosofia utilizada no desenvolvimento do LOCUS foi a de modularidade do programa, possuindo em função disso, cerca de 5000 linhas e 32 subrotinas.

A descrição funcional das subrotinas, o diagrama em árvore, o fluxograma de funcionamento e a sequência de execução do programa estão descritos nos sub-ítem a seguir.



#### 4.2.1 - Descrição Funcional das Subrotinas

SUBROTINA	FUNCAO
APASSO	Ajusta o passo (incremento de tempo) conforme os valores de $\Delta \epsilon$ e $\Delta \alpha$ encontrados a cada nível de tempo
CALCAR	Calcula uma sequência de cargas impostas ( W ) e ângulos $\psi$ , que serão utilizados como dado de entrada
CARGAH	Calcula a força hidrodinâmica
CHUTE	Calcula o valor que será utilizado como perturbação para o cálculo das derivadas que compõem a matriz Jacobiana do sistema
CONVERGE	Testa a convergência do método SOR, na solução do sistema linear, resultante da discretização da equação de Reynolds
DADOS	Define dados iniciais comuns a qualquer simulação
DERIVA	Calcula as derivadas que compõem a matriz Jacobiana do sistema
DPASSO	Diminui o passo (intervalo de tempo), caso não tenha ocorrido convergência
DIAGRAMA	Plota na tela, em baixa resolução, a órbita traçada pelo eixo, a cada dez convergências

---

EXPLODE	Interpola as cargas aplicadas ( W ) e os ângulos $\psi$ , a cada centésimo de grau do eixo do girabrequim
GRAFICO	Verifica se é momento da plotagem da órbita do eixo
INICOR	Inicializa variáveis auxiliares utilizadas na obtenção da órbita do eixo
LECARG	Lê uma sequência de cargas impostas ( W ) e ângulos $\psi$ , que serão utilizados como dado de entrada
LIMITE	Verifica se os valores de $\Delta\epsilon$ e $\Delta\alpha$ encontrados não ultrapassaram limites operacionais pré-estabelecidos
LINEAR	Resolve o sistema linear, cujos valores servirão de chute inicial para o sistema não linear
MENSAG	Apresenta ao usuário uma mensagem, no término da execução do programa
NOLINE	Resolve o sistema não linear (Método de Newton-Raphson), obtendo como resultado $\Delta\epsilon$ e $\Delta\alpha$
OLD	Armazena valores do passo (nível de tempo) anterior
PERTURBA	Aplica pequena perturbação em $\epsilon$ , $\dot{\epsilon}$ , $\alpha$ , para o cálculo das derivadas que compõem a matriz Jacobiana do sistema

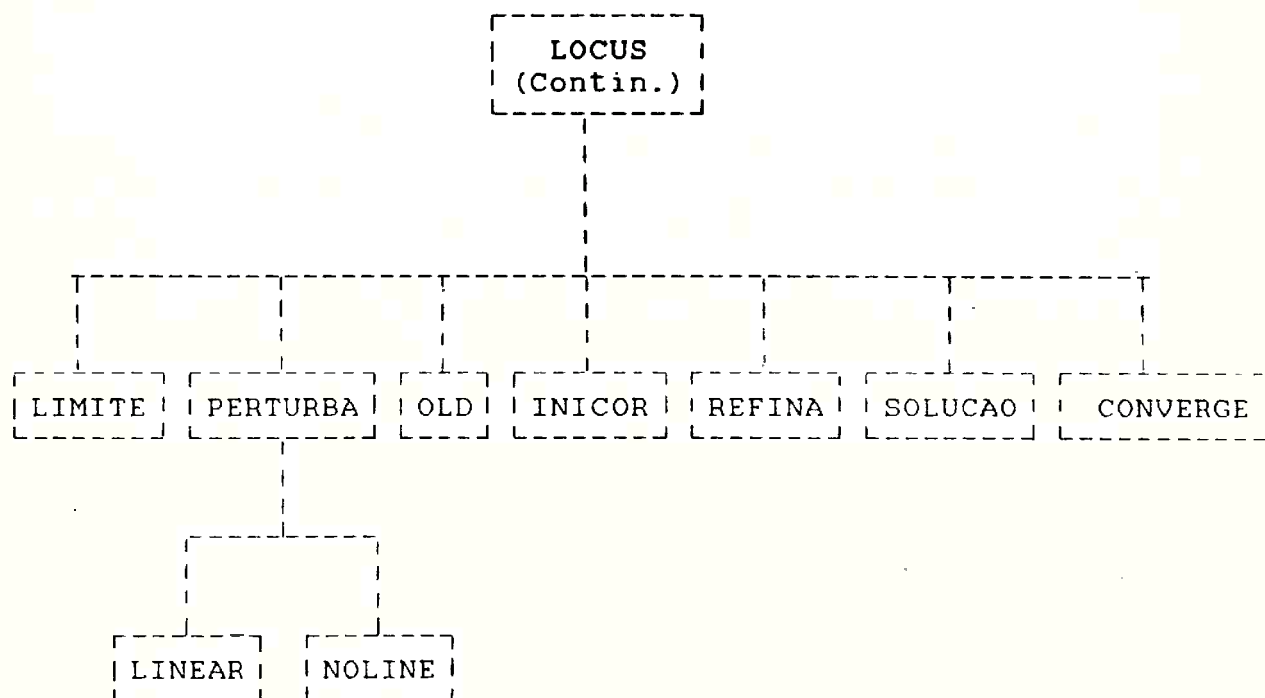
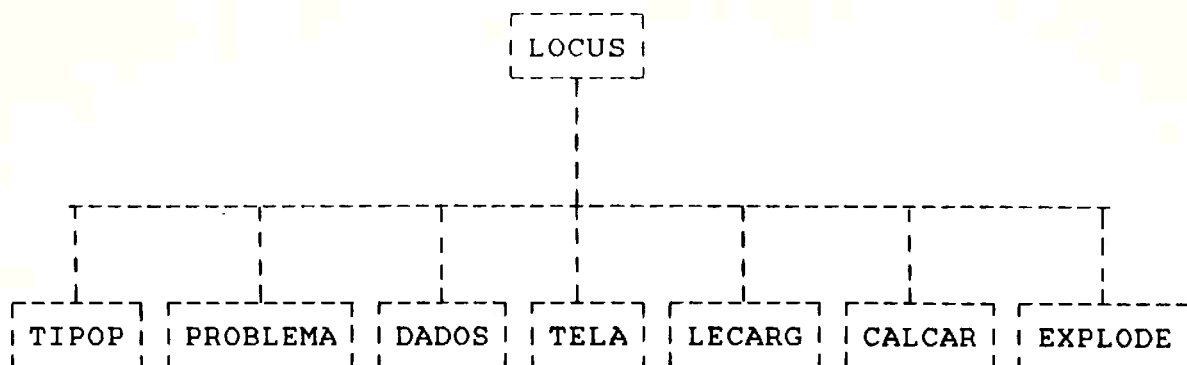
---

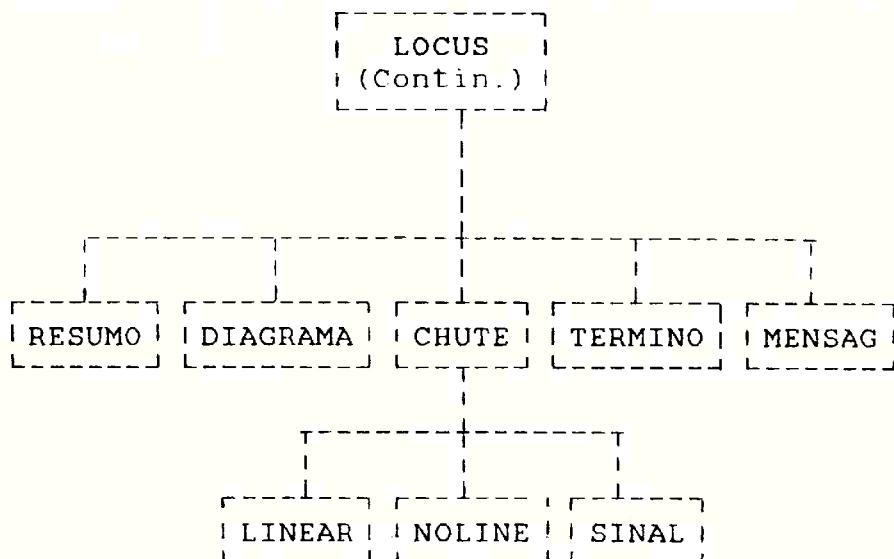
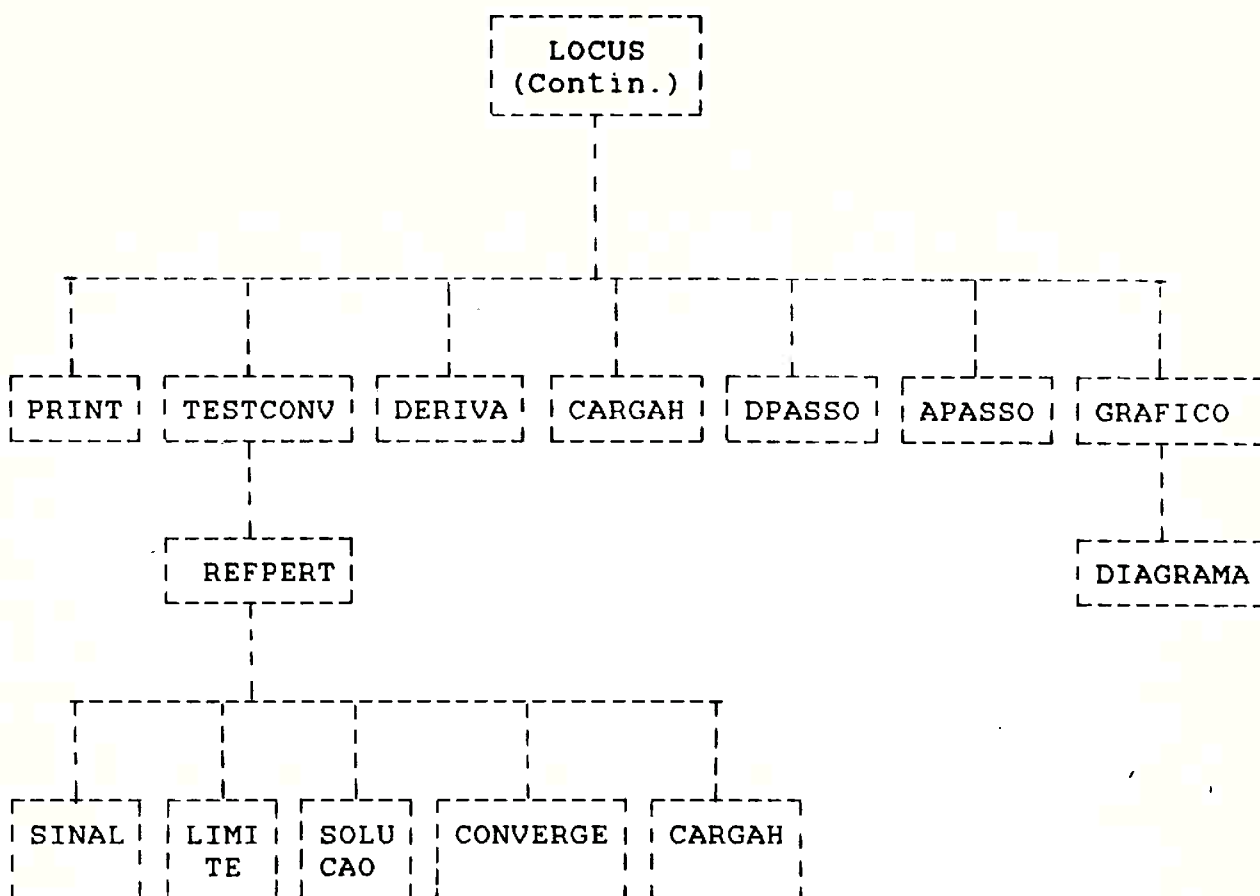
---

PESAN	Interpola as pressões máximas e espessuras mínimas do filme de óleo a cada cinco graus do mancal, a cada intervalo de tempo
PROBLEMA	Solicita ao usuário os dados do problema a ser simulado (dados de entrada)
PRINT	Impressão parcial de resultados
REFINA	Determina tamanhos variados de $\Delta\alpha$ , em função da região de máxima pressão
RESUMO	Apresenta um resumo das principais propriedades hidrodinâmicas do mancal, ao término da execução do programa
SINAL	Identifica direção a ser tomada pelo método iterativo, para o cálculo de $\delta\epsilon$ e $\delta\alpha$ , a cada incremento de tempo, com o objetivo de melhorar o processo de convergência
SOLUCAO	Resolve o sistema linear resultante da discretização da equação de Reynolds por diferenças finitas
TELA	Apresenta ao usuário a tela-selo do programa LOCUS
TESTCONV	Testa a convergência entre a força hidrodinâmica calculada ( $f_h$ ) e a carga imposta ao mancal ( $W$ )

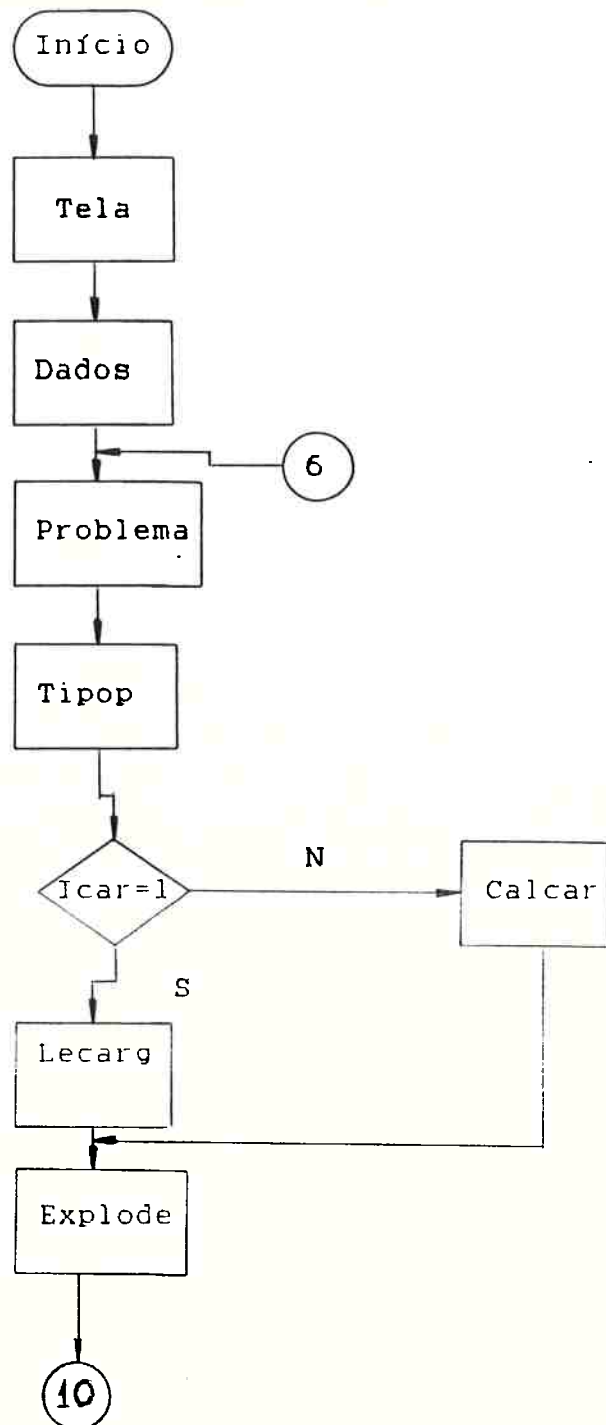
---

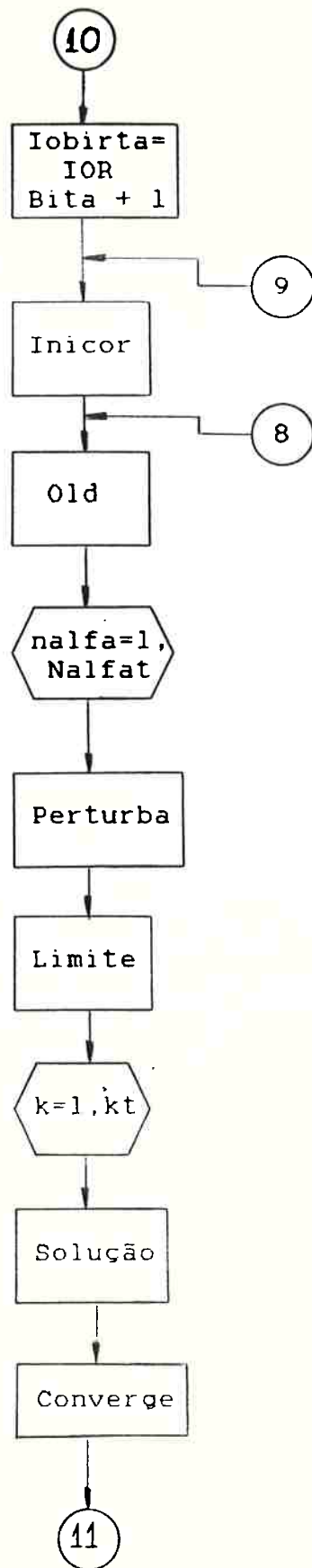
## 4.2.2 - Diagrama em Arvore

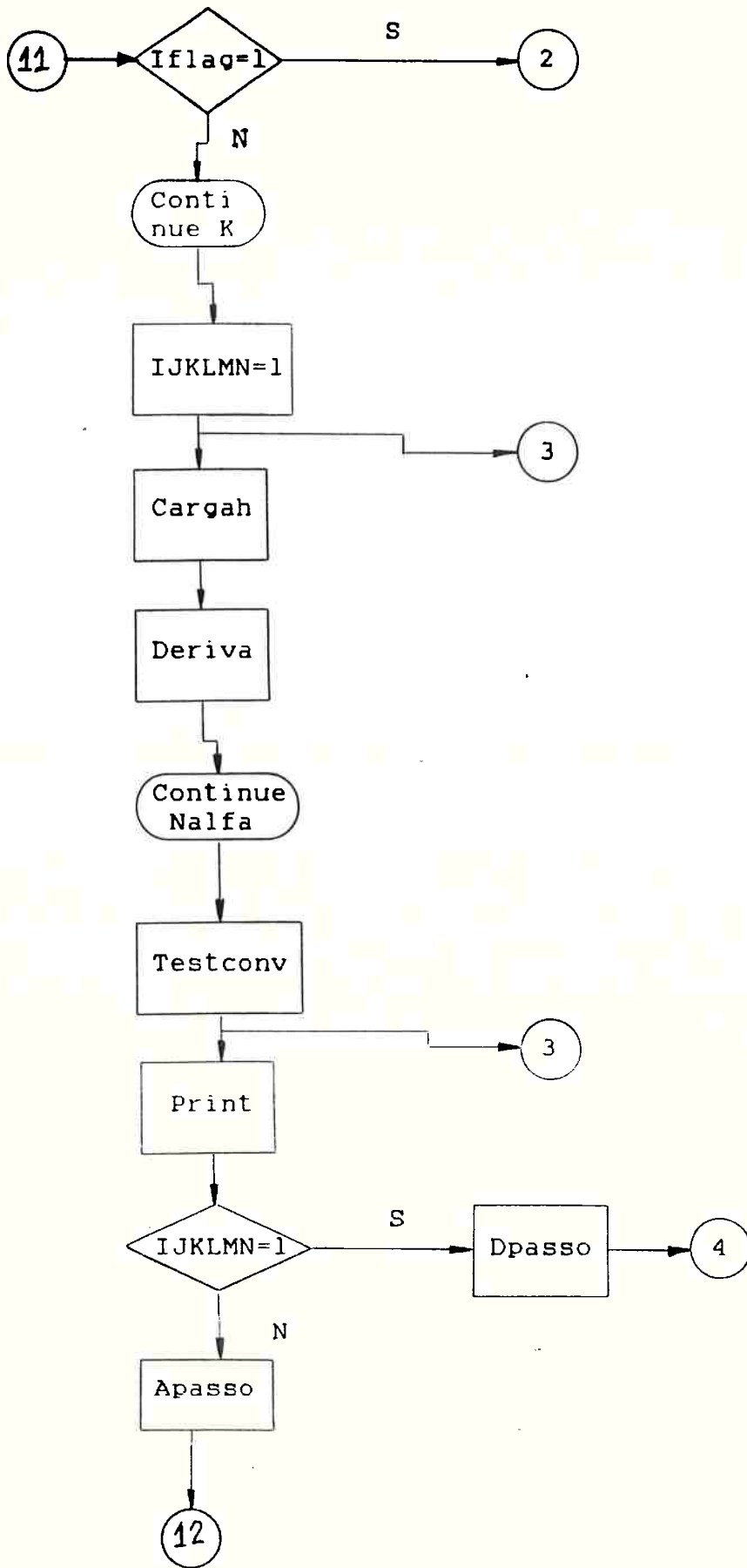




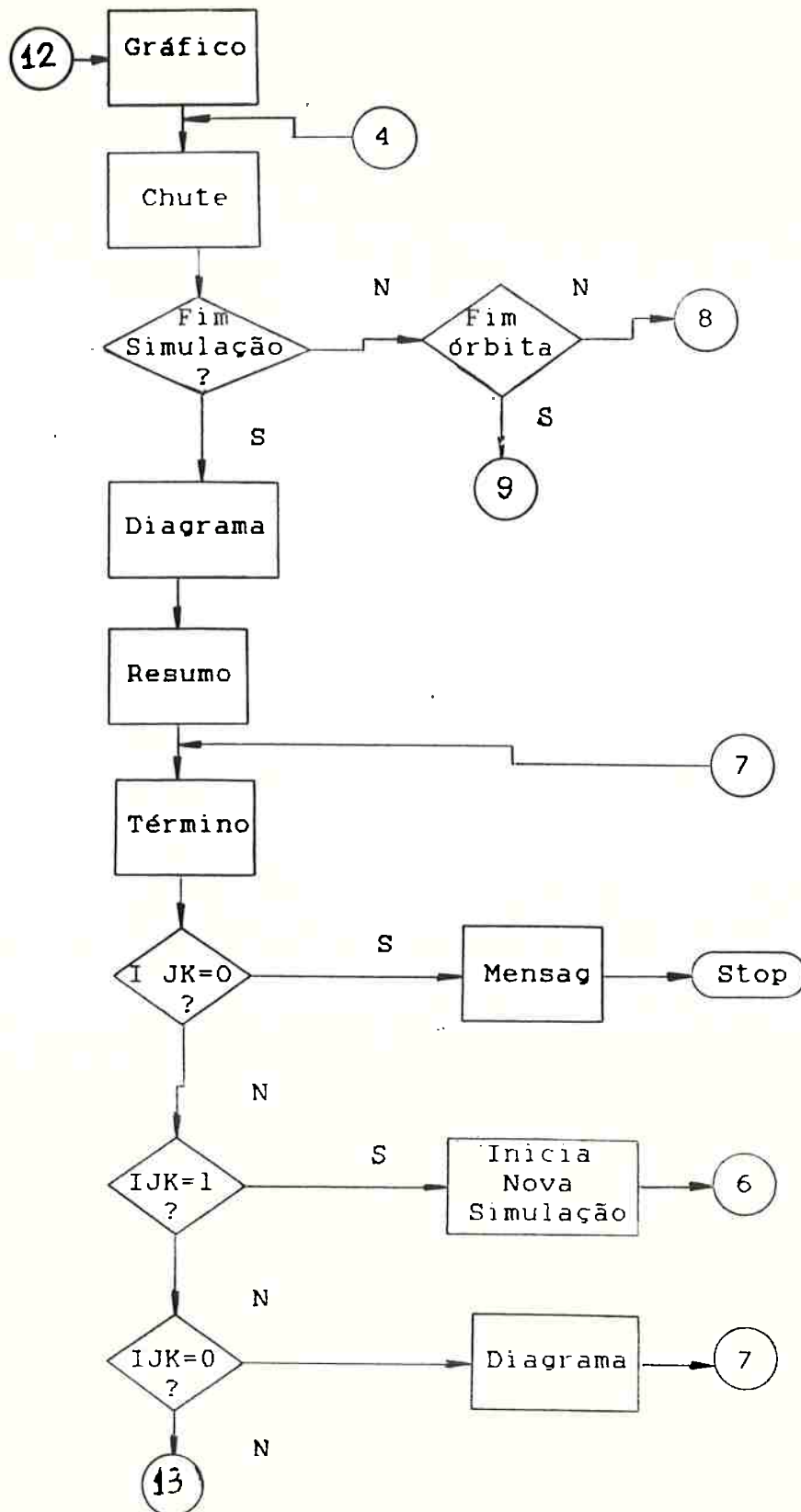
## 4.2.3. - Fluxograma de Funcionamento

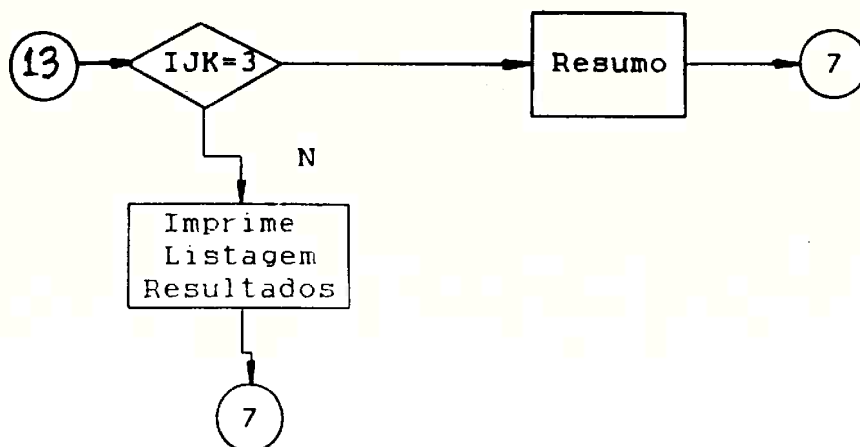




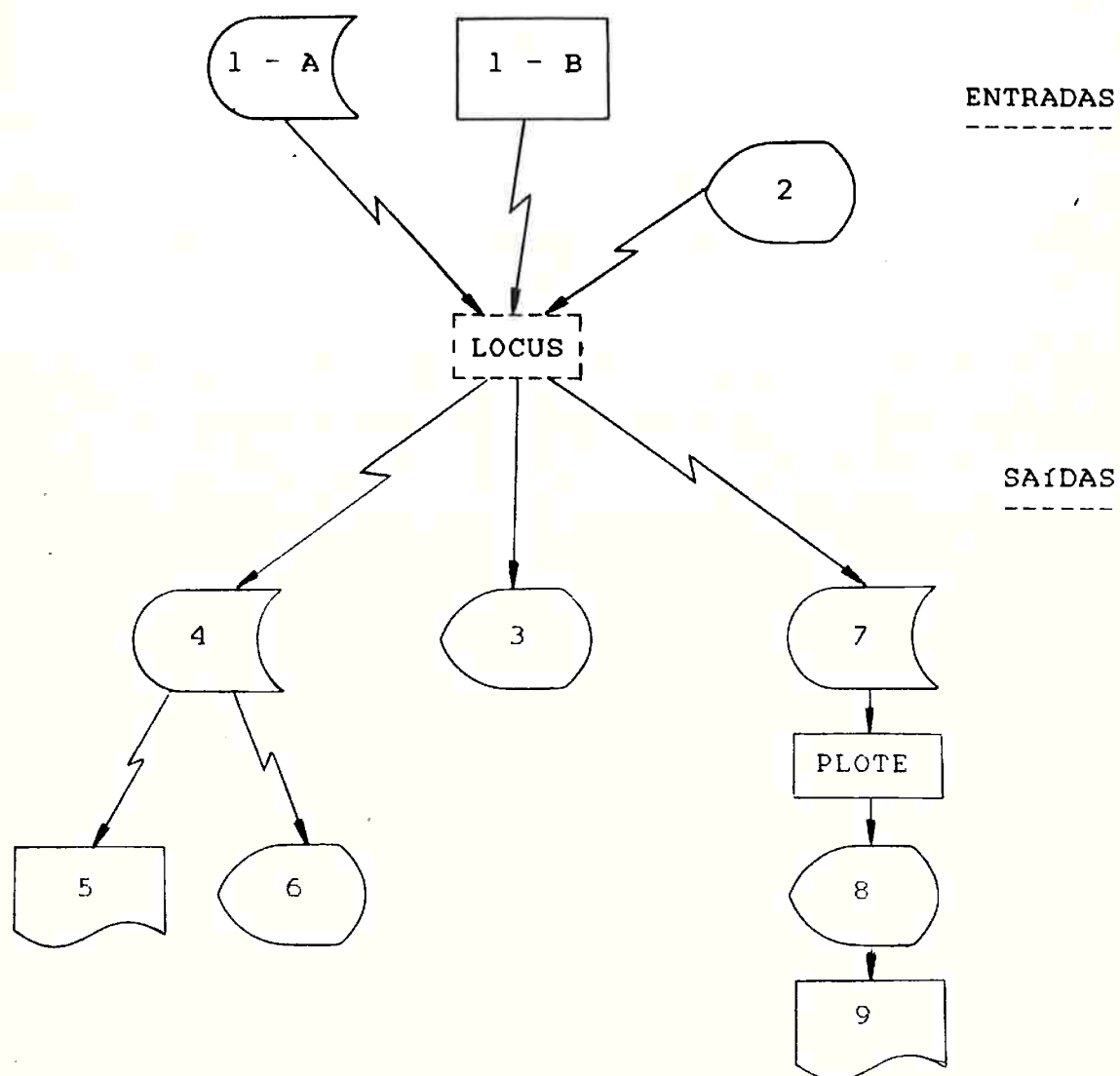








#### 4.2.4 - Fluxograma de Entradas e Saídas de Dados



onde:

#### ENTRADAS

- 1 - Representa cargas impostas ( W ) e ângulos  $\psi$  que podem ser lidos de um arquivo definido antecipadamente (1-A) ou calculado no interior do programa locus (1-B).
- 2 - Representa entrada de dados através do terminal VT52 , definindo os parâmetros do problema a ser simulado.

#### SAÍDAS

- 3 - Representa saída total de resultados no terminal VT52.
- 4 - Representa armazenamento em arquivo de nome LOCUS.DAT , de todo o processo de simulação, desde o preenchimento dos dados de entrada até a apresentação total de resultados no terminal VT52.
- 5 - Representa possibilidade de impressão do arquivo LOCUS . DAT na impressora LPA0.
- 6 - Representa possibilidade de apresentação do arquivo LOCUS.DAT no terminal VT52.
- 7 - Representa armazenamento de dados em arquivo, cujo nome é especificado pelo usuário, contendo os principais resultados obtidos da simulação e que possibilitam a geração de gráficos para melhor interpretação.
- PLOTE é um programa em linguagem FORTRAN, possuindo comandos do software PLOT10, destinado à geração de gráficos. Esse programa pode somente ser executado no terminal gráfico 4125, e recebe como dado de entrada o arquivo 07, descrito anteriormente.

- 8 - Representa apresentação de gráficos gerados a partir da execução do programa PLOTE, tendo como dado de entrada o arquivo 07. A apresentação desses resultados só é possível no terminal gráfico TEKTRONIKS-4125.
- 9 - Representa possibilidade de Hard-copy, através do equipamento TEKTRONIK 4692, dos gráficos gerados em 8.

## 5 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DO PROGRAMA

=====

Neste capítulo, os dados gerados pelos programas desenvolvidos são comparados com dados de literatura.

### 5.1 - Comparação de Resultados para Carregamento Estático

A comparação de resultados foi obtida utilizando-se dados de literatura (1) e resultados gerados pelo programa MANCAL.

Os dados utilizados de literatura (1) para comparação foram gerados na década de 60, através de computador digital. Segundo o livro fonte, são resultados obtidos da solução da equação adimensional de Reynolds para mancais alinhados e perfeitamente circulares.

Foram tabelados para várias excentricidades e para várias razões adimensionais L/D, os seguintes ítems:

- ( i ) - Número de Sommerfeld
- ( ii ) - Vazão volumétrica de óleo
- (iii) - Angulo de carga
- ( iv ) - Coeficiente de atrito

Introduzindo dados no Programa MANCAL, que garantissem fatores L/D iguais aos de literatura, pode-se obter a comparação de resultados. As tabelas, a seguir, mostram os resultados obtidos e os desvios percentuais entre os resultados calculados pelo Programa MANCAL e os resultados de literatura (1).

#### 5.1.1 - Comparação dos Resultados para L/D = 1,0

Os dados de entrada utilizados foram:

- Folga diametral ----- FD = 100 microns
- Rotação do eixo ----- N = 3000 rpm
- Largura da bronzina ----- RL = 50 mm
- Diâmetro do eixo ----- DD = 50 mm
- Viscosidade do óleo ----- 10 mPa-s

Os resultados obtidos foram:

NÚMERO DE SOMMERFELD			
$\epsilon$	LITERATURA	CALCULADO	DESVIO %
0,20	0,632	0,633	0,158
0,40	0,261	0,261	0
0,60	0,120	0,121	0,833
0,80	0,0448	0,0445	0,670
0,95	0,00855	0,00837	2,10

VAZÃO DE ÓLEO			
$\epsilon$	LITERATURA	CALCULADO	DESVIO %
0,20	0,186	0,177	4,91
0,40	0,357	0,349	2,39
0,60	0,552	0,517	6,43
0,80	0,730	0,681	6,77
0,95	0,878	0,804	8,39

-----  
**ANGULO DE CARGA**  
 -----

$\epsilon$	LITERATURA	CALCULADO	DESVIO %
0,20	74,0	73,8	0,270
0,40	62,0	62,5	0,806
0,60	50,0	50,4	0,800
0,80	36,0	36,1	0,278
0,95	16,0	19,3	20,6

-----  
**COEFICIENTE DE ATRITO**  
 -----

$\epsilon$	LITERATURA	CALCULADO	DESVIO %
0,20	0,0258	0,0240	6,98
0,40	0,0116	0,0103	11,2
0,60	0,00642	0,00553	13,9
0,80	0,00342	0,00288	15,8
0,95	0,00135	0,00119	11,8

### 5.1.2 - Comparação de Resultados para L/D = 0,50

Os dados de entrada utilizados foram:

- Folga diametral ----- FD = 100 microns
- Rotação do eixo ----- n = 3000 RPM
- Largura da bronzina ----- RL = 50 mm
- Diâmetro do eixo ----- DD = 100 mm
- Viscosidade do óleo ----- 10 mPa-s

Os resultados encontrados foram:

-----			
NÚMERO DE SOMMERFELD			
-----			
$\epsilon$	LITERATURA	CALCULADO	DESVIO %
-----			
0,20	2,01	2,04	1,49
-----			
0,40	0,785	0,790	0,637
-----			
0,60	0,320	0,321	0,312
-----			
0,80	0,0920	0,0931	1,20
-----			
0,95	0,0119	0,0123	3,36
-----			



-----  
 VAZÃO DE ÓLEO  
 -----

€	LITERATURA	CALCULADO	DESVIO %
0,20	0,443	0,419	5,41
0,40	0,884	0,837	5,27
0,60	1,32	1,25	5,26
0,80	1,77	1,67	5,50
0,95	2,11	2,00	5,16

-----  
 ANGULO DE CARGA  
 -----

€	LITERATURA	CALCULADO	DESVIO %
0,20	75,0	75,0	0
0,40	62,0	61,7	0,484
0,60	48,0	48,0	0
0,80	33,0	32,9	0,303
0,95	15,0	17,2	14,7

-----  
 COEFICIENTE DE ATRITO  
 -----

$\epsilon$	LITERATURA	CALCULADO	DESVIO %
0,20	0,0409	0,0380	7,09
0,40	0,0171	0,0150	12,33
0,60	0,00808	0,00682	15,6
0,80	0,00325	0,00267	17,8
0,95	0,000869	0,000753	13,3

5.1.3 - Comparação de Resultados para L/D = 0,25

Os dados de entrada utilizados foram:

- Folga diametral ----- FD = 100 microns
- Rotação do eixo ----- N = 3000 rpm
- Largura da bronzina ----- RL = 50 mm
- Diâmetro do eixo ----- DD = 200 mm
- Viscosidade do óleo ----- 10 mPa-s

Os resultados obtidos foram:

-----  
**NÚMERO DE SOMMERFELD**  
 -----

E	LITERATURA	CALCULADO	DESVIO %
0,20	7,58	7,59	0,132
0,40	2,85	2,84	0,351
0,60	1,07	1,08	0,935
0,80	0,266	0,262	1,50
0,95	0,0231	0,0230	0,433

-----  
**VAZÃO DE ÓLEO**  
 -----

E	LITERATURA	CALCULADO	DESVIO %
0,20	0,926	0,880	4,97
0,40	1,84	1,76	4,48
0,60	2,59	2,64	1,86
0,80	3,68	3,51	4,51
0,95	4,38	4,18	4,62

-----  
 ANGULO DE CARGA  
 -----

€	LITERATURA	CALCULADO	DESVIO %
0,20	75,0	75,3	0,400
0,40	61,0	61,1	0,164
0,60	47,0	46,8	0,425
0,80	31,0	31,2	0,645
0,95	15,0	15,8	5,34

-----

-----  
 COEFICIENTE DE ATRITO  
 -----

€	LITERATURA	CALCULADO	DESVIO %
0,20	0,0765	0,0706	7,71
0,40	0,0307	0,0267	13,0
0,60	0,0133	0,0111	16,8
0,80	0,00446	0,00357	20,0
0,95	0,000790	0,000652	17,5

-----

Analisando as comparações anteriores, verifica-se que os resultados gerados pelo programa MANCAL apresentam, em relação aos dados de literatura (1), as seguintes características:

I - Número de Sommerfeld

L / D	DESVIO %		
	MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO
1,00	0	0,752	2,10
0,50	0,127	0,542	0,995
0,25	0,132	0,670	1,50

II - Angulo de Carga

L / D	DESVIO %		
	MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO
1,00	0,270	4,55	20,6
0,50	0	3,10	14,7
0,25	0,164	1,39	5,34

### III - Vazão de Oleo

L /	DESVIO %		
	MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO
D			
1,00	2,39	5,78	8,39
0,50	5,16	5,32	5,50
0,25	1,86	4,09	4,97

### IV - Coeficiente de Atrito

L /	DESVIO %		
	MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO
D			
1,00	6,98	11,9	15,8
0,50	7,09	13,2	17,8
0,25	7,71	15,0	20,0

As técnicas utilizadas para a solução da equação de Reynolds por métodos numéricos, assim como toda a teoria matemática utilizada no desenvolvimento do Programa MANCAL, são exatamente as mesmas utilizadas pela literatura. Contudo, o autor não menciona como foi feita a discretização do domínio quanto ao número de malhas adotadas em cada direção (  $x$  ,  $z$  ) e quanto ao tamanho dos incrementos (fixos ou variados).

O Programa MANCAL, por sua vez, apresenta uma discretização bastante refinada, com tamanhos variados de incrementos em relação a  $x$  , principalmente na região de máxima pressão.

Assim, alguns desvios percentuais, consideravelmente altos, podem ser em função da eventual diferença do número de malhas e tamanho dos incrementos adotados em cada caso.

## 5.2 - Comparação de Resultados com Carregamento Dinâmico

A comparação de resultados foi obtida, utilizando-se dados de literatura (17) e resultados gerados pelo programa desenvolvido.

Os dados de entrada comuns às comparações são:

- Folga diametral ----- FD = 100 microns
- Rotação do eixo ----- N = 3000 RPM
- Largura da bronzina ----- RL = 20 mm
- Diâmetro do eixo ----- DD = 100 mm
- Viscosidade do óleo ----- 10 mPa-s

Utilizou-se para critério de comparação, a órbita descrita pelo eixo de um mancal, sujeito a diferentes carregamentos. Os resultados das comparações encontram-se nos sub-ítem a seguir.

### 5.2.1 - Orbita do Eixo com Carregamento Co-Rotativo + Carga Média

O carregamento Co-Rotativo + Carga Média caracteriza-se por apresentar uma composição de duas cargas aplicadas, de módulos constantes ao longo do tempo.

A composição das cargas pode ser representada por:

$$\vec{w} = x_1 \hat{j} + x_2 \left[ \cos(\theta) \hat{j} - \sin(\theta) \hat{i} \right] \quad (5.2.1)$$

onde:

.  $\theta$  é o ângulo do girabrequim

O primeiro termo da expressão (5.2.1) representa a carga média aplicada sobre o eixo y do mancal, enquanto que o segundo termo representa um carregamento, cujo ângulo de aplicação gira no mesmo sentido que o eixo.

Foram escolhidas da literatura (17), para efeito de comparação, três órbitas geradas por carregamentos Co-Rotativos + Carga Média, descritas da seguinte forma:

$$. \quad 2w' = 10 \quad (5.2.2)$$

$$. \quad 2w' = 15 \quad (5.2.3)$$

$$. \quad 2w' = 75 \quad (5.2.4)$$

onde

.  $w'$  é um adimensional dado por:

$$w' = \frac{w}{V}$$

$$. \quad V = 1000 \text{ N}$$



Assim as expressões (5.2.2) a (5.2.4) representam, respectivamente, cargas aplicadas no valor de 5000, 7500 e 37500 N.

No primeiro caso, o carregamento Co-Rotativo é dado pela expressão:

$$2w' = 10 \quad \text{====} \quad w = 5000 \text{ N}$$

As figuras (5.2.1), (5.2.2) e (5.2.3) representam, respectivamente, as comparações das órbitas com as características acima descritas, extraídas da literatura (17), com o programa LOCUS.

As órbitas com traço contínuo foram geradas pelo LOCUS, enquanto as que possuem traço contínuo, mesclado a um carácter '+', são as órbitas da literatura (17).

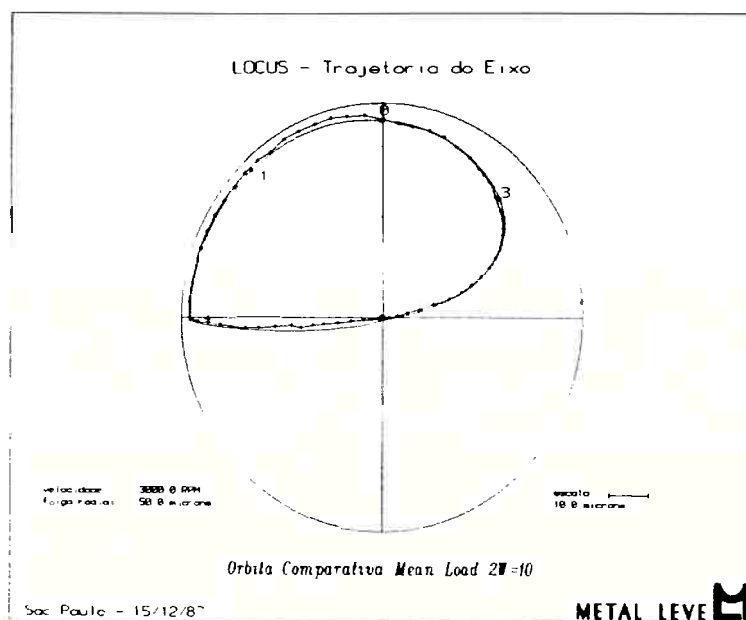


Fig. 5.2.1 - Órbita Carga Média  $2w' = 10$

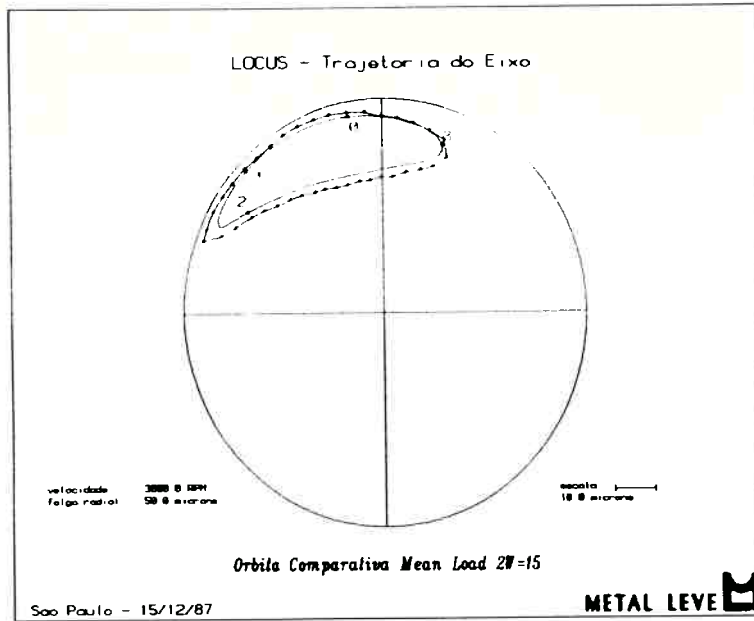


Fig. 5.2.2 - Orbita Carga Média  $2w' = 15$

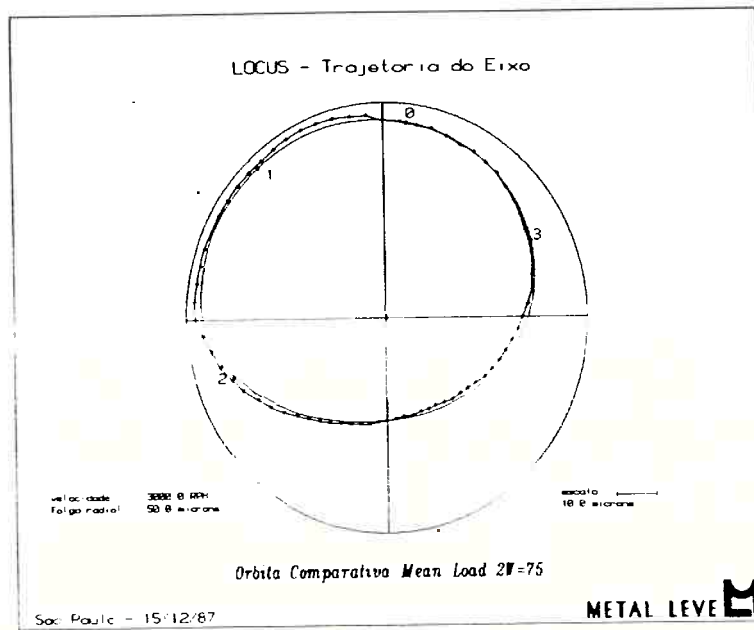


Fig. 5.2.3 - Orbita Carga Média  $2w' = 75$

### 5.2.2 - Orbita do Eixo com Carregamento Vetorial

O carregamento vetorial caracteriza-se por apresentar uma composição de duas cargas aplicadas de mesmo módulo, constante ao longo do tempo.

A figura (5.2.4) apresenta a comparação de uma órbita, gerada pelo carregamento vetorial, extraída da literatura, com o programa LOCUS. Para esse caso, as cargas aplicadas possuem características Co-Rotativas. Contudo, a velocidade angular do ângulo de aplicação da segunda carga é dez vezes maior que a da primeira.

A figura (5.2.5) apresenta a mesma comparação descrita anteriormente, porém, as cargas aplicadas não são as mesmas da figura (5.2.4). O ângulo de aplicação da primeira carga gira no mesmo sentido que o eixo, enquanto que na segunda, o ângulo de aplicação gira no sentido contrário. A velocidade angular do ângulo de aplicação da segunda carga é dez vezes maior que a velocidade angular da primeira.

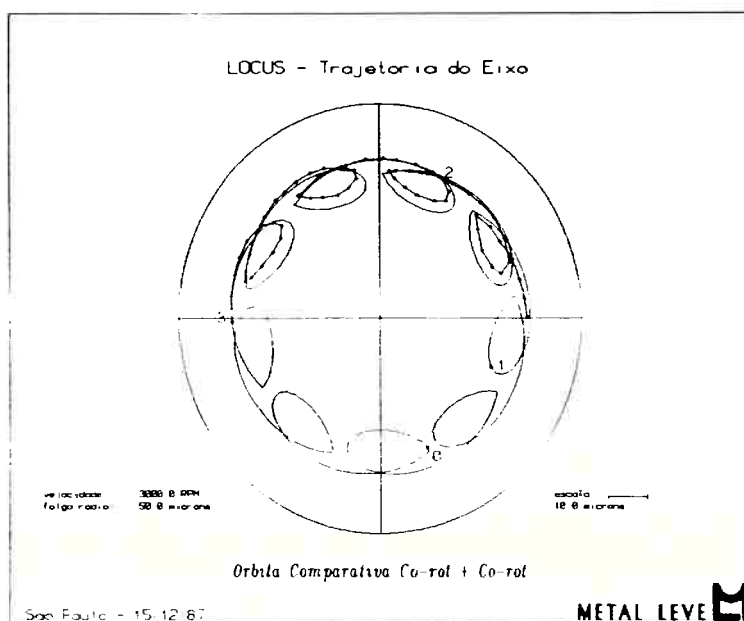
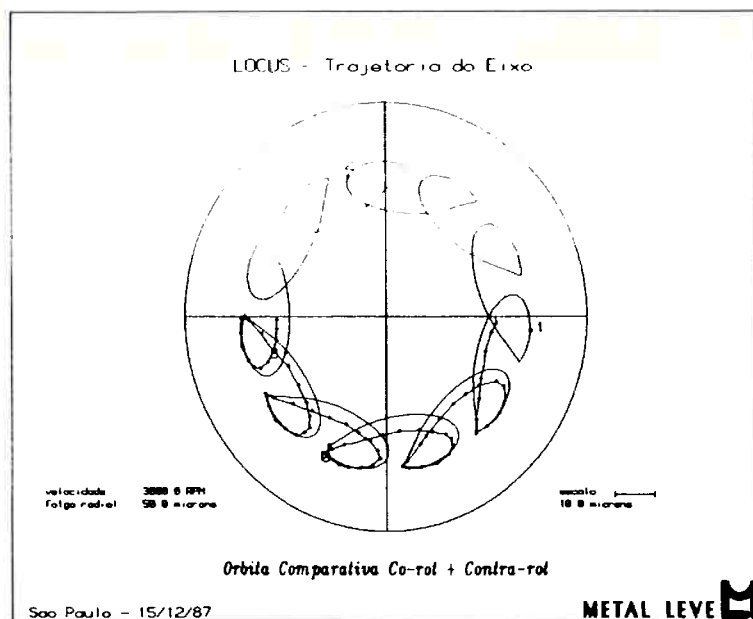


Fig. 5.2.4 - Orbita do Carregamento Vetorial  
(Co-Rotativo + Co-Rotativo)



**Fig. 5.2.5 - Orbita do Carregamento Vetorial  
(Co-Rotativo + Contra-Rotativo)**

Em ambas as figuras, a linha cheia representa a órbita gerada pelo LOCUS, enquanto a linha tracejada, mesclada ao caractere " + " , representa a órbita extraída da literatura (17).

O método utilizado para a geração das órbitas, aqui usadas para efeito de comparação com os resultados do programa LOCUS, contém critérios de convergência e incrementos temporais significativamente menos restritos que os usados pelo programa LOCUS (5). Consequentemente, é de se esperar que os resultados não sejam exatamente iguais. Apesar das diferenças dos enfoques usados nos dois casos, pode-se verificar que as órbitas são bastante parecidas.

## 6 - APLICACOES DO PROGRAMA LOCUS A PROJETO DE MANCAIS

O programa aqui desenvolvido pode ser usado para o desenvolvimento de projetos otimizados de mancais hidrodinâmicos. Com a evolução dos motores em termos de relação peso/potência, consumo e emissões, torna-se imperativo a simulação de mancais sob condições reais de operação, para que se possa antecipar possíveis falhas e projetar mancais apropriados às devidas finalidades.

### 6.1 - Parâmetros de Projeto

Um mancal hidrodinâmico passa por várias fases distintas de projeto. Todas elas contribuem para um produto final devidamente adequado às situações operacionais propostas, de tal maneira que o mesmo consiga sustentar a carga imposta, sem sofrer, entre outras, as seguintes falhas prematuras (29):

- ( i ) Fadiga
- ( ii ) Desgaste superficial excessivo
- (iii) Erosão superficial devido à cavitação

Os dados de entrada e saída do programa estão esquematizados na figura 6.1

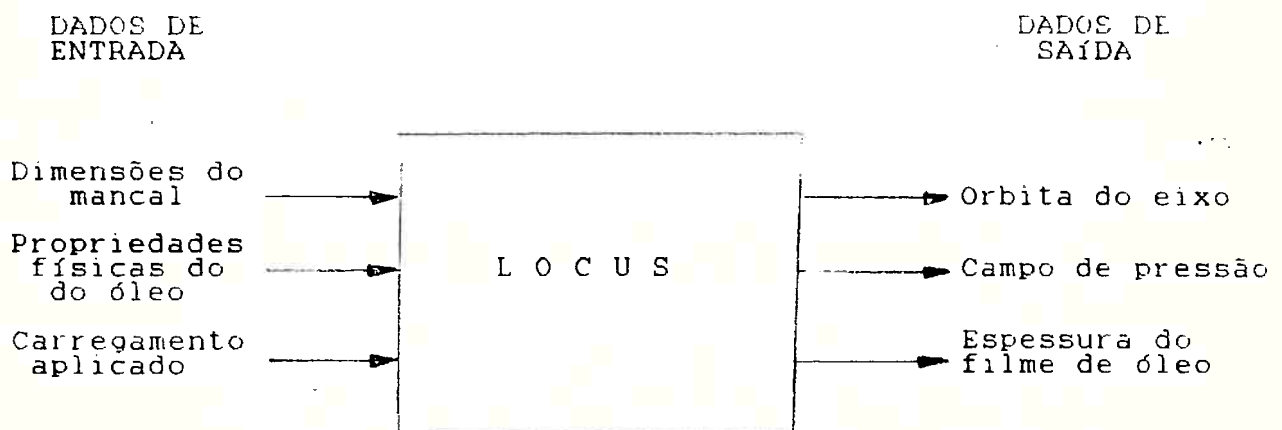


Fig. 6.1 - Dados de Entrada e Saída do Programa.

O projetista de mancal prepara um conjunto de dados de entrada e usa o programa LOCUS para a simulação, recebendo como dado de saída um conjunto de variáveis, que permitem ao projetista a visualização do comportamento do mancal, sob condições reais de funcionamento. Esta visualização é, então, usada para avaliar o desempenho do mancal. Em função desta avaliação, os dados de entrada podem ser modificados, até que se chegue a um projeto devidamente otimizado para as condições operacionais desejadas.

## 6.2 - Orbita do Eixo

A órbita do eixo dentro do mancal é uma das saídas gráficas produzidas pelo programa LOCUS.

Uma órbita típica é dada pela figura 6.2.

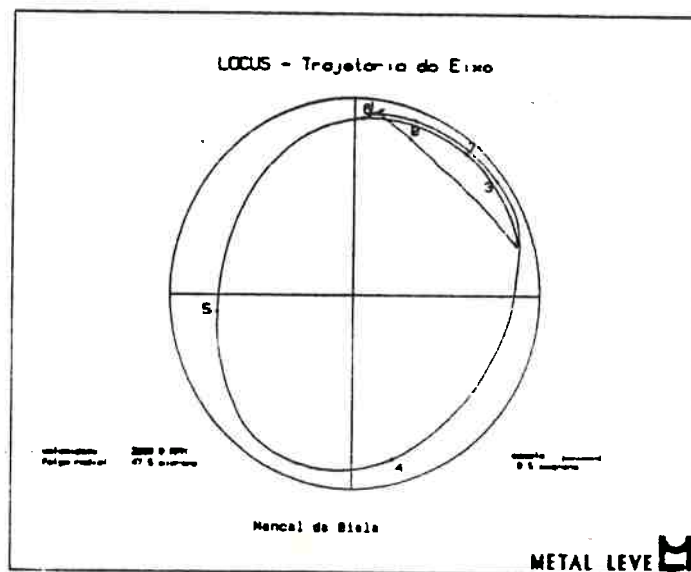


Fig. 6.2 - Orbita do Eixo

O diagrama da órbita é plotado de tal maneira que a espessura do filme possa ser medida radialmente em cada ponto do mancal. Uma das finalidades da análise desta órbita é a de detectar se, durante a operação, o mancal não terá espessuras de filme menores que certos valores pré-determinados experimentalmente. Se isto ocorrer, o mancal sofrerá desgaste superficial excessivo.

O segundo fenômeno, que pode ser detectado através de uma análise orbital, é o fenômeno de cavitação. A cavitação basicamente se origina no colapso de bolhas geradas numa região de baixa pressão (abaixo da pressão de vapor do fluido), que implodem ao passar para uma região de alta pressão. A passagem brusca de um filme fino para um filme espesso gera este fenômeno em mancais. Se isto for observado na órbita gerada, deve-se mudar os parâmetros de projetos (dados de entrada do programa), de tal modo a evitar o fenômeno de erosão superficial, o qual, obviamente, é prejudicial ao funcionamento do mancal.

### 6.3 - Gráfico de Pressão Máxima do Filme de Oleo em função do Angulo no Mancal

O programa LOCUS gera também, como dado de saída, um gráfico de pressão máxima do filme de óleo em função da posição no mancal.

A análise deste gráfico permite ao projetista saber as pressões, as quais as várias regiões do mancal serão submetidas em condições reais de operação. Esta informação é extremamente importante por dois motivos.

Primeiramente, pode-se saber as pressões as quais a superfície do mancal será submetida. Regiões submetidas à altas pressões indicam susceptibilidade à fadiga prematura do material. Se alguma região do mancal for submetida à pressões maiores que as admissíveis, deve-se, então, mudar as variáveis do projeto, de tal forma a eliminar esta possível falha.

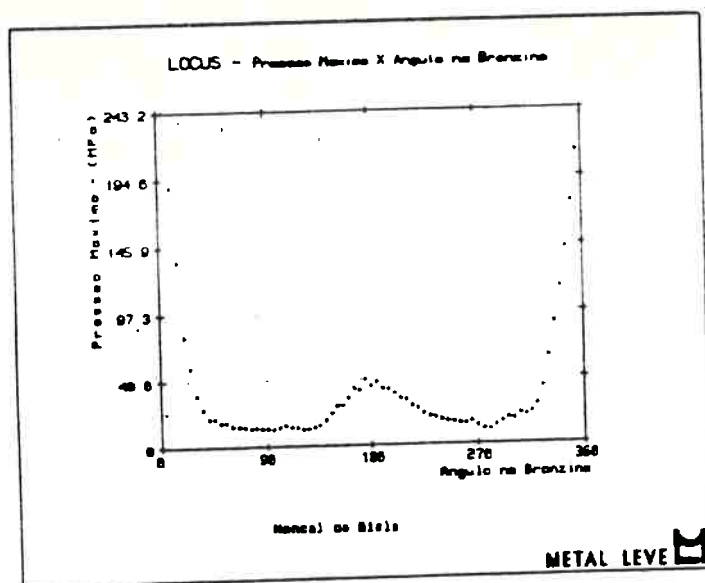


Fig. 6.3 - Pressão Máxima do Filme de Oleo em  
Função do Ângulo no Mancal

A segunda informação importante ao projetista é com relação ao posicionamento de furos de lubrificação. Obviamente, deve-se evitar furos de lubrificação nas regiões de alta pressão.

#### 6.4 - Espessura Mínima do Filme de Oleo em função do Ângulo no Mancal

Um outro dado de saída do LOCUS, que é bastante usado pelo projetista de mancais, é o gráfico de espessura mínima do filme de óleo em função do ângulo no mancal.

Através deste gráfico, pode-se detectar as espessuras mínimas do filme de óleo nas várias regiões do mancal. Espessuras de filme muito baixas indicam condição favorável para contato eixo - mancal e possível desgaste superficial prematuro.



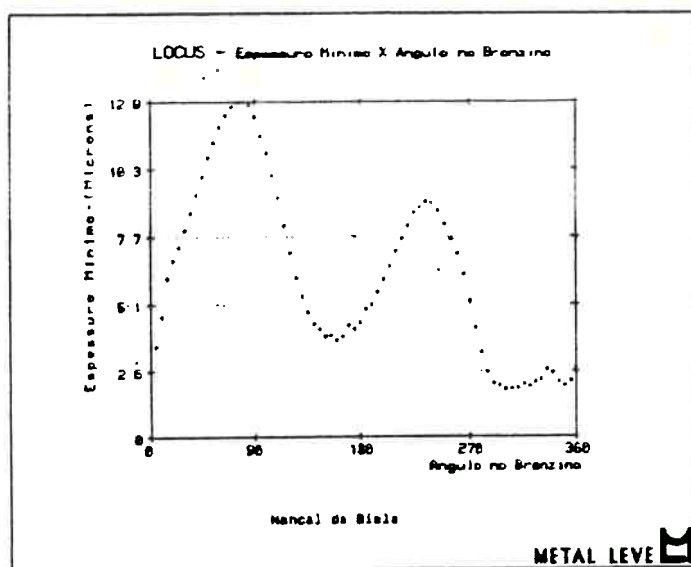


Fig. 6.4 - Espessura Mínima do Filme de óleo em  
Função do Ângulo no Mancal

As espessuras de filme deste gráfico são comparadas com valores experimentais de espessuras críticas. Se em algum lugar do mancal houver espessura de filme menor que a admissível, deve-se novamente mudar os parâmetros de projeto para evitar esta possível falha durante a operação do mancal no motor.

Em resumo, pode-se dizer que, com os resultados das simulações feitas pelo programa LOCUS, é possível projetar um mancal devidamente adequado às condições operacionais propostas, através da avaliação e prevenção de possíveis falhas prematuras de desgaste superficial excessivo, fadiga e erosão por cavitação.

## 7 - Aplicação do Programa LOCUS para a Determinação de Condições de Contorno para a Análise de Tensões num Pistão

Quando os pistões de alumínio começaram à substituir os pesados pistões de ferro fundido na década de 30, as potências específicas dos motores de combustão interna eram relativamente pequenas. Porém, os constantes desenvolvimentos nesta área causaram um crescimento acelerado das potências específicas dos motores, o que implicou também num aumento drástico das solicitações térmicas e mecânicas do pistão. Isto fez com que as ocorrências de falhas prematuras no pistão se tornassem mais frequentes. Um tipo de falha bastante comum é a ocorrência de trincas no cubo do pistão (35).

Para amenizar este problema foram desenvolvidos vários recursos de projeto em termos de geometria do cubo (35). Entre eles, um amplamente usado na prática (36) é o alívio lateral ("side relieves"), que consiste na usinagem de dois canais semi-cilíndricos ao longo do furo para pino, simétricos ao eixo vertical, conforme esquematizado na figura 7.1.

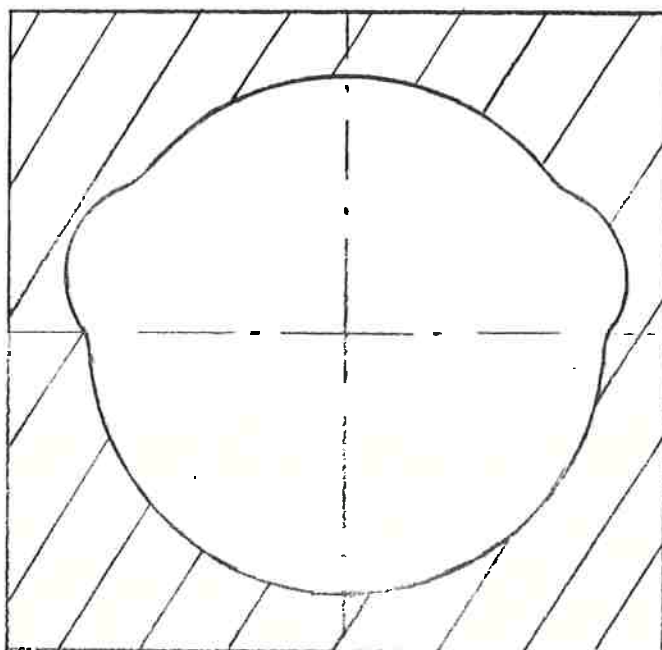


Fig. 7.1 - Furo para Pino com Alívios Laterais

Os alívios laterais, acreditava-se (36), diminuíam a probabilidade do surgimento de trincas no cubo do pistão por absoverem a ovalização do pino e conseqüentemente diminuir o nível de tensão local. Porém, em testes de laboratório (35) ficou comprovado que a simulação destas trincas só era possível com a utilização de pulsadores hidráulicos, que permitem a formação de um filme de óleo entre o pino e o cubo do pistão. Com a evidenciação deste fato constatou-se, então, a necessidade de melhor compreender este fenômeno do ponto de vista hidrodinâmico.

### 7.1 - Determinação do Diagrama de Carga

Para a determinação do diagrama de carga desenvolveu-se um programa específico (35) que considera a força do gas e a inércia das massas oscilantes. Foi feita uma simulação para um motor Diesel ID, de 11 litros, turbo alimentado, com potência nominal de 220 KW e com pistões de 127 mm de diâmetro. Os diagramas de carga advindos destas simulações aparecem nas figuras 7.2 e 7.3

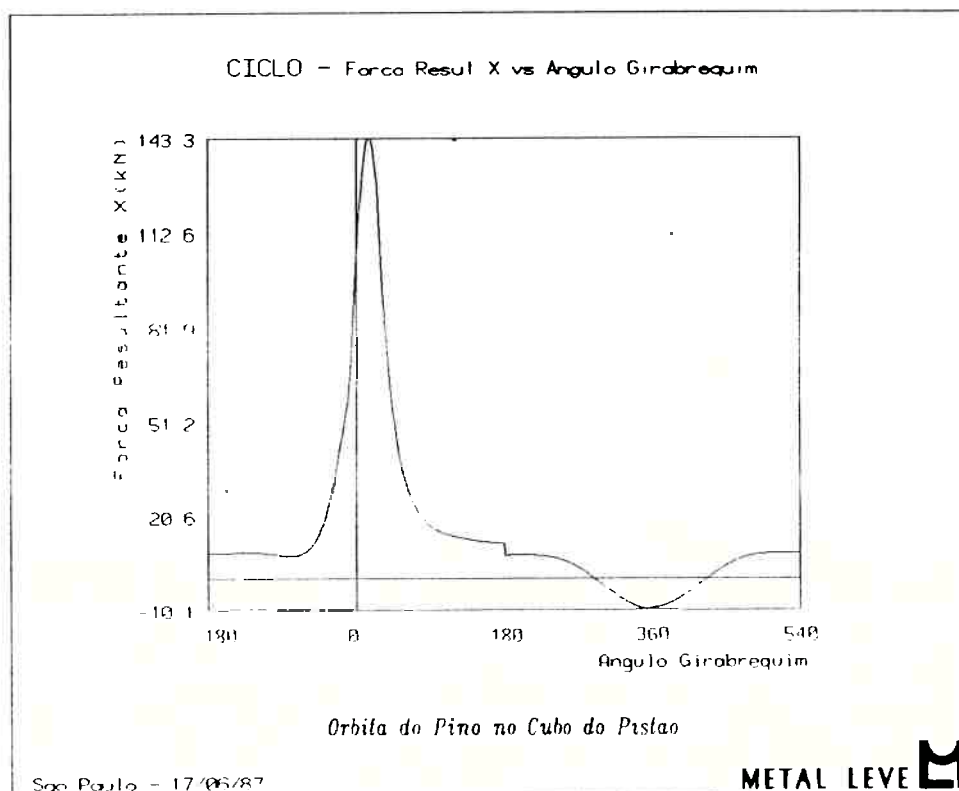


Fig. 7.2 - Força Resultante no Eixo X (Vertical)

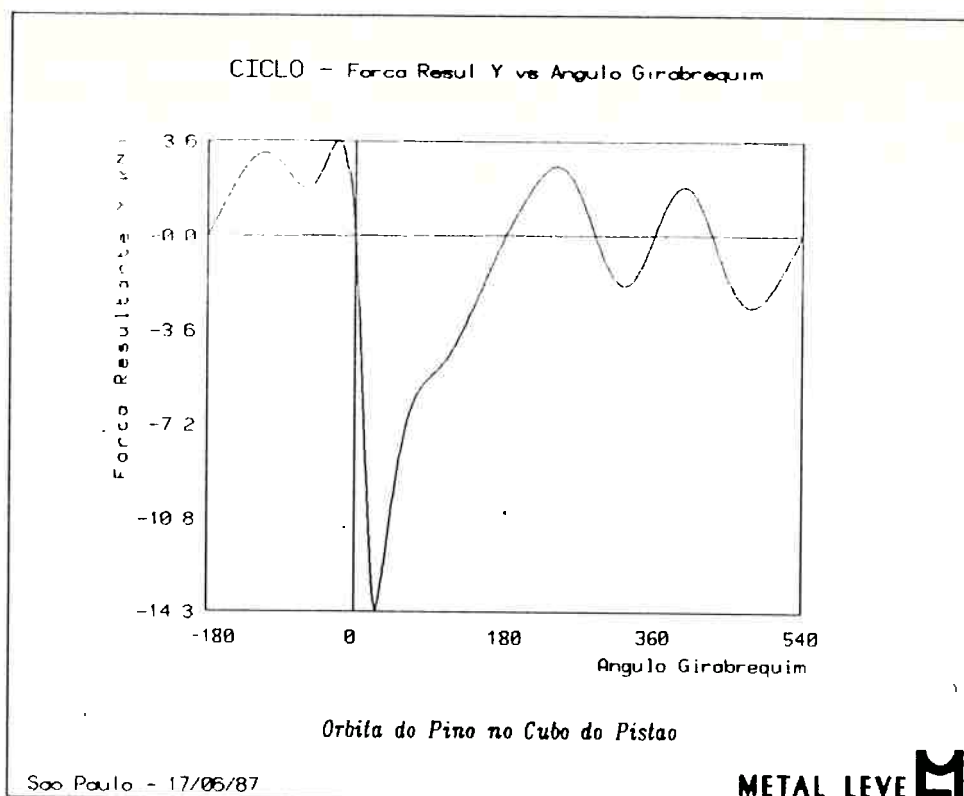


Fig. 7.3 - Força resultante no Eixo Y (Horizontal)

## 7.2 - Orbita do Pino no Cubo do Pistão

O programa LOCUS foi usado para simular a órbita do pino no cubo do pistão, com o diagrama de carga apresentado acima. Três folgas diametraes foram usadas :

- i) 5 microns - folga de montagem
- ii) 50 microns - folga para motores operando à meia carga
- iii) 90 microns - folga para motores em plena carga

As figuras 7.4, 7.5 e 7.6 representam as órbitas do pino dentro do cubo do pistão para as três folgas diametraes usadas.

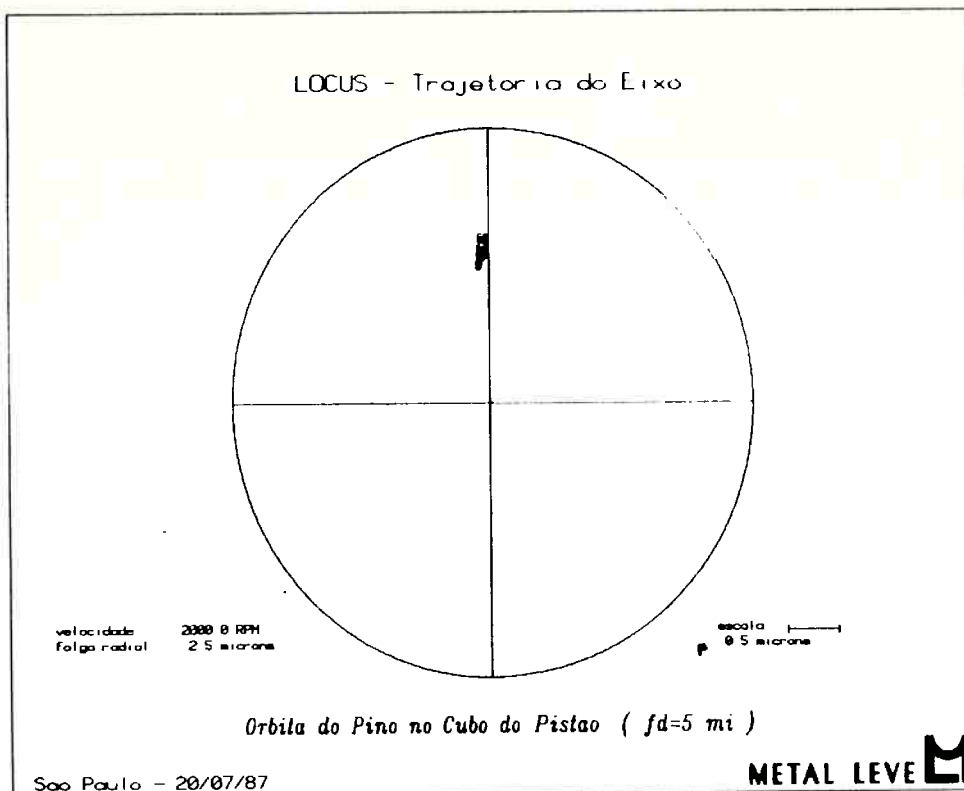


Fig. 7.4 - Orbita do Pino no Cubo do Pistão com Folga Diametral de 5 microns

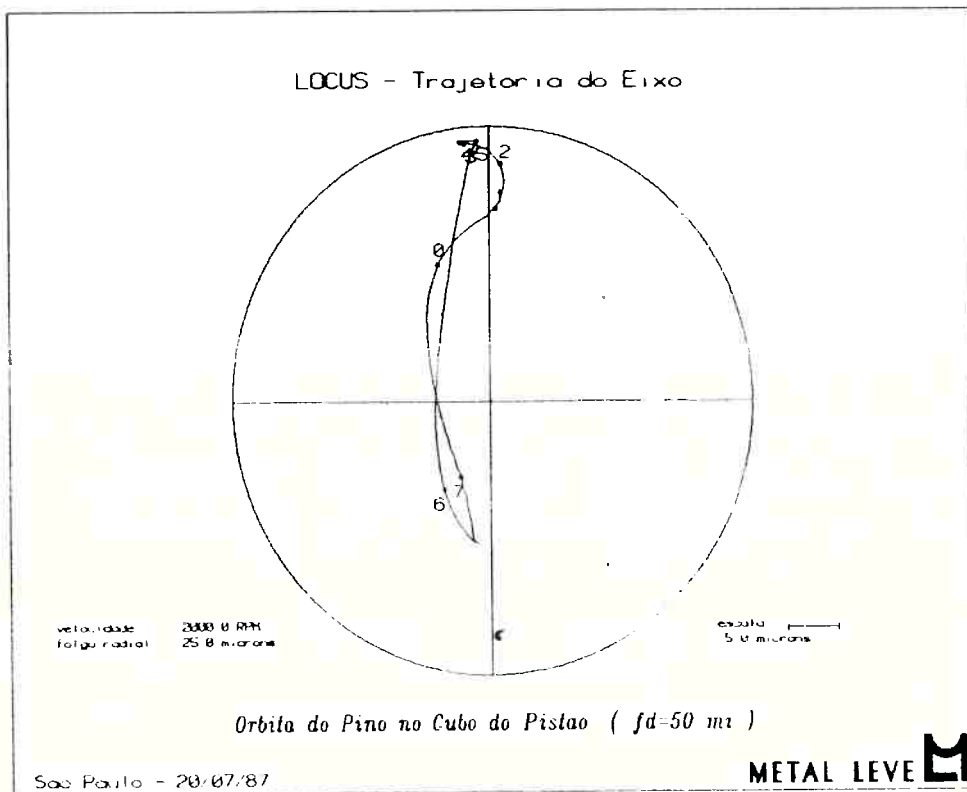


Fig. 7.5 - Orbita do Pino no Cubo do Pistão com Folga Diametral de 50 microns

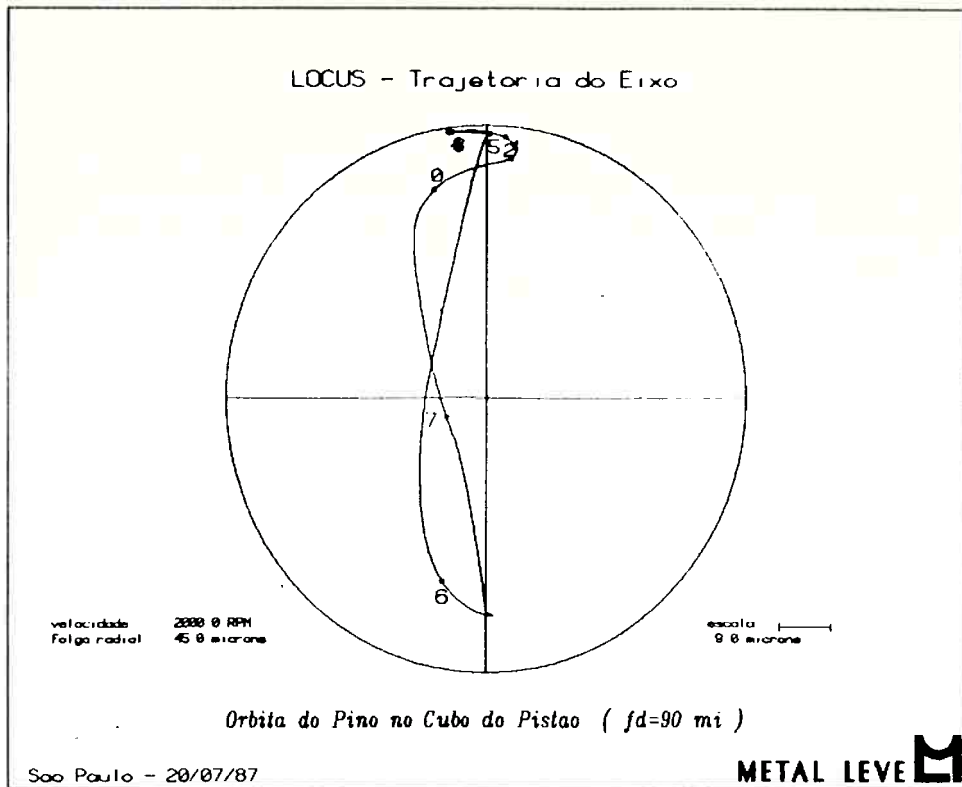


Fig. 7.6 - Orbita do pino no Cubo do pistão com Folga Diametral de 90 microns

### 7.3 - Análise de Tensão com Elemento de Gape

Foi feita uma análise de tensão no cubo do pistão através do método dos elementos finitos (programa ANSYS - versão 4.2). A condição de contorno usada para o pino e o cubo do pistão foi, neste caso, elementos de gape ("gap elements"). Esta é amaneira tradicionalmente usada para se obter a distribuição de tensão em pistões, sem considerar os efeitos do campo de pressão hidrodinâmica. As figuras 7.7 e 7.8 mostram a distribuição de tensões obtidas, num corte transversal e paralelo ao pino, respectivamente.

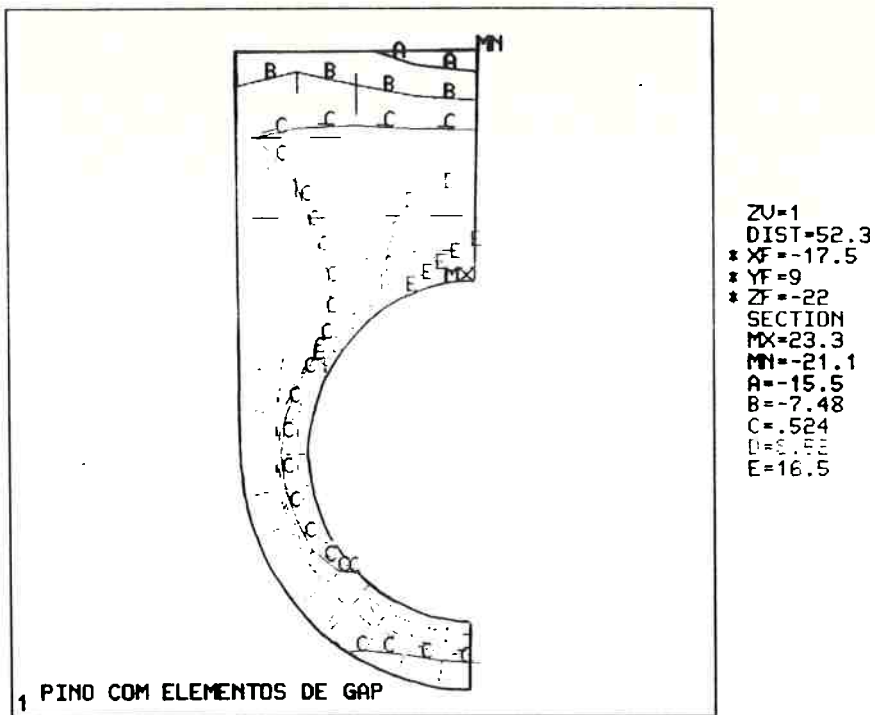


Fig. 7.7 - Distribuição de Tensão num Corte Transversal ao Pino

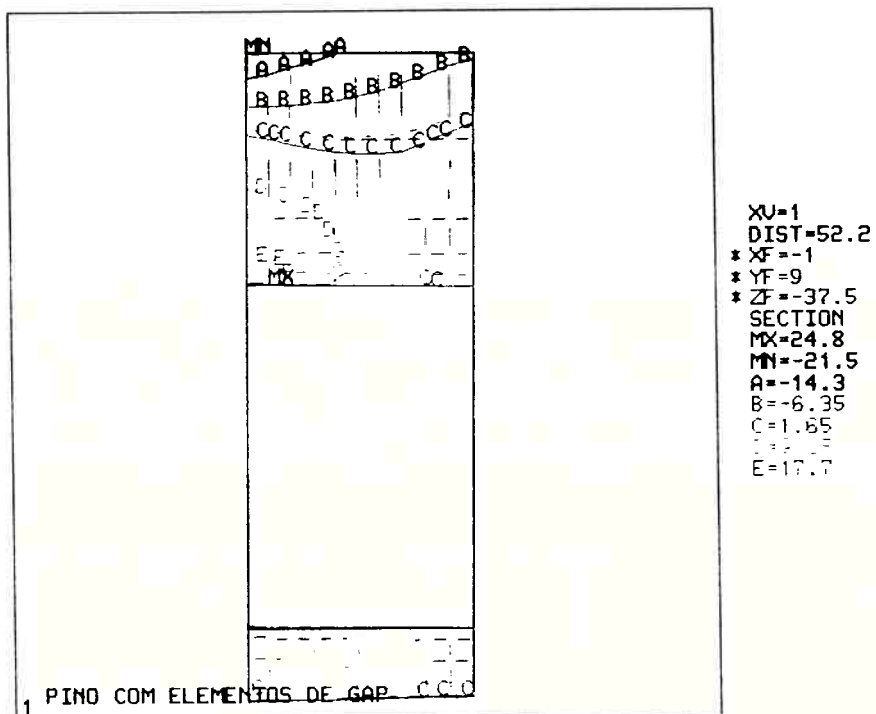


Fig. 7.8 - Distribuição de Tensão num Corte Paralelo ao Pino

#### 7.4 - Análise de Tensão com Pressão Hidrodinâmica

Neste caso usou-se o campo de pressão hidrodinâmica como condição de contorno para a análise de elementos finitos. As figuras 7.9 e 7.10 mostram a distribuição de tensão resultante, num corte perpendicular, e paralelo ao pino, respectivamente.

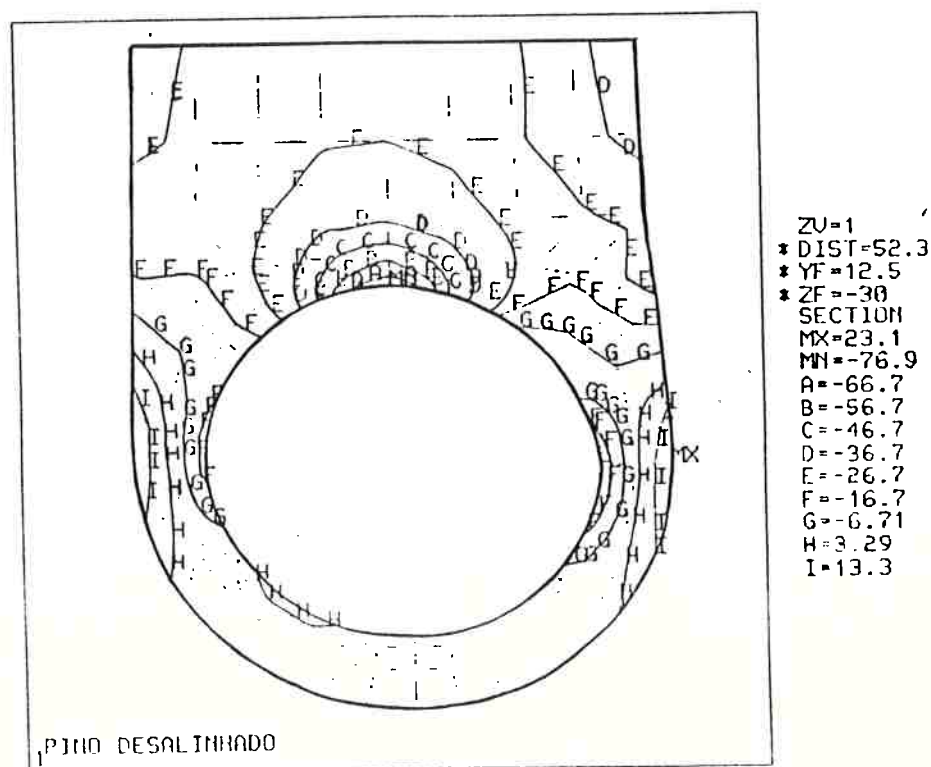


Fig. 7.9 - Distribuição de Tensão num Corte Perpendicular ao Pino Considerando-se a Pressão Hidrodinâmica



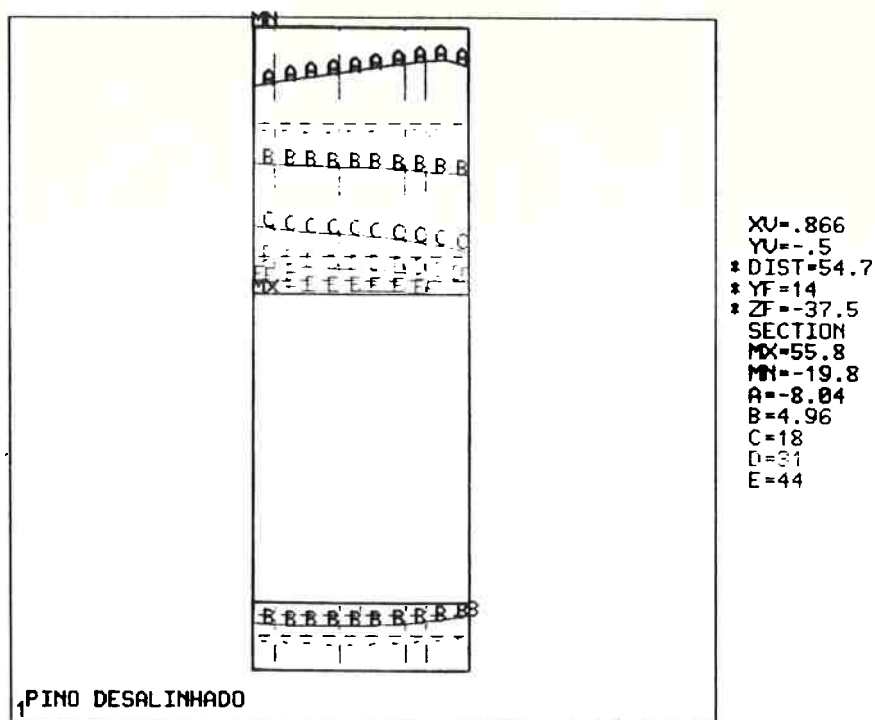


fig. 7.10 - Distribuição de Tensão num Corte Paralelo ao Pino Considerando-se a Pressão Hidrodinâmica

Conforme pode ser verificado pelos resultados acima a tensão circunferencial, considerando-se o efeito da pressão hidrodinâmica é de 76,9 MPa. A análise tradicional com elementos de gape apresentou uma tensão circunferencial máxima de 21,1 MPa. Estes resultados evidenciam a importância da consideração do efeito hidrodinâmico na análise estrutural do pistão e na previsão de falha do cubo.

Com os resultados acima pode-se explicar porque os alívios laterais são tão eficientes na prevenção do surgimento de trincas no cubo do pistão. Os alívios laterais aumentam a pressão hidrodinâmica máxima porém diminuem consideravelmente as tensões de tração na região crítica, conforme esquematizado nas figuras 7.11 e 7.12.

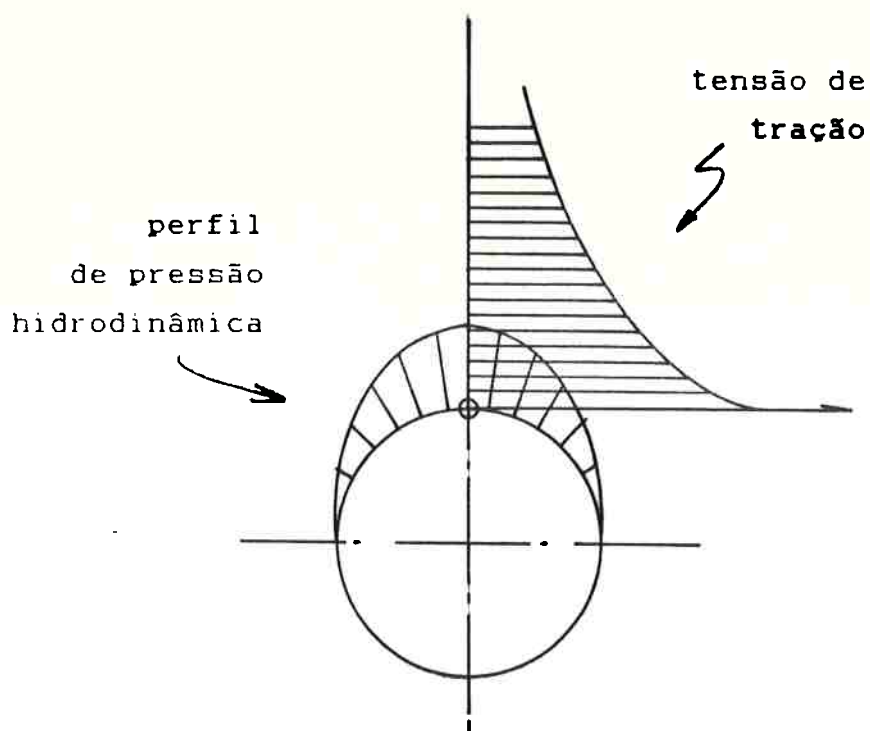


Fig. 7.11 - Perfil de Pressão Hidrodinâmica e Tensão de Tração no Cubo sem Alívio Lateral

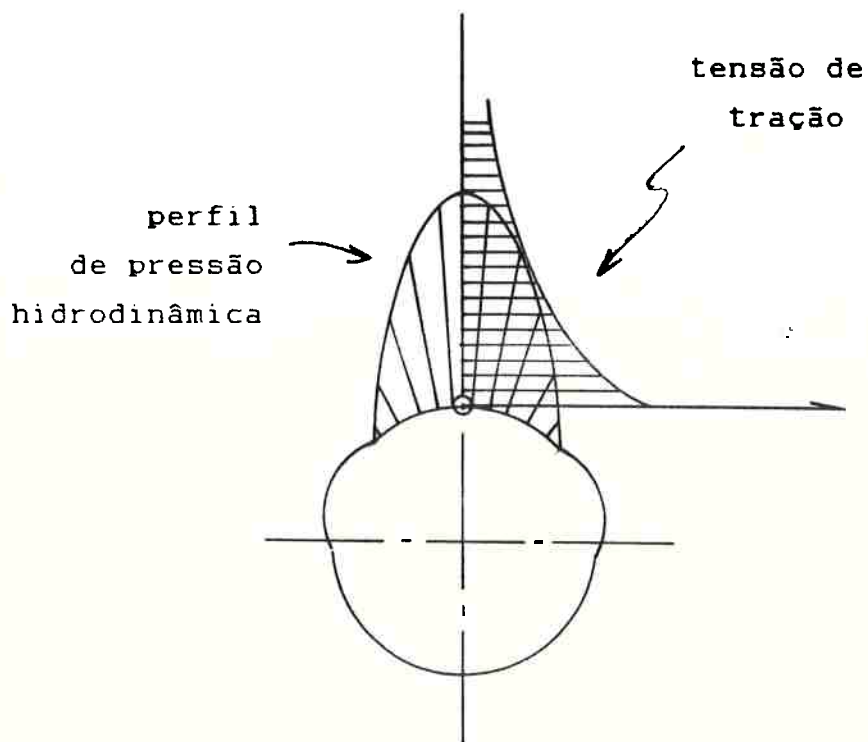


Fig. 7.12 - Perfil de Pressão Hidrodinâmica e tensão de Tração no Cubo com Alívio Lateral

## 8 - PERFILAMENTO AXIAL EM MANCAIS HIDRODINAMICOS RADIAIS

Neste capítulo serão abordados, quantitativamente, parâmetros operacionais de um caso real. O programa LOCUS será usado para simular as condições operacionais de um mancal convencional. Posteriormente, serão introduzidas modificações geométricas na superfície do mancal e o mesmo será novamente simulado pelo programa LOCUS. As diferenças entre as características operacionais, nos dois casos, serão então analisadas.

Foi adotado um mancal com as seguintes características :

- diâmetro interno ----- 101 mm
- largura ----- 40 mm
- folga diametral ----- 112 microns
- velocidade angular do eixo ----- 2300 rpm
- viscosidade do óleo ----- 10 mPa-s

A carga aplicada foi calculada através de um outro programa, chamado LOAD (33), que leva em consideração as forças inerciais do conjunto pistão - biela e as forças de expansão dos gases de combustão. Os componentes  $x$  e  $y$  da carga aplicada aparecem na figura 8.1.

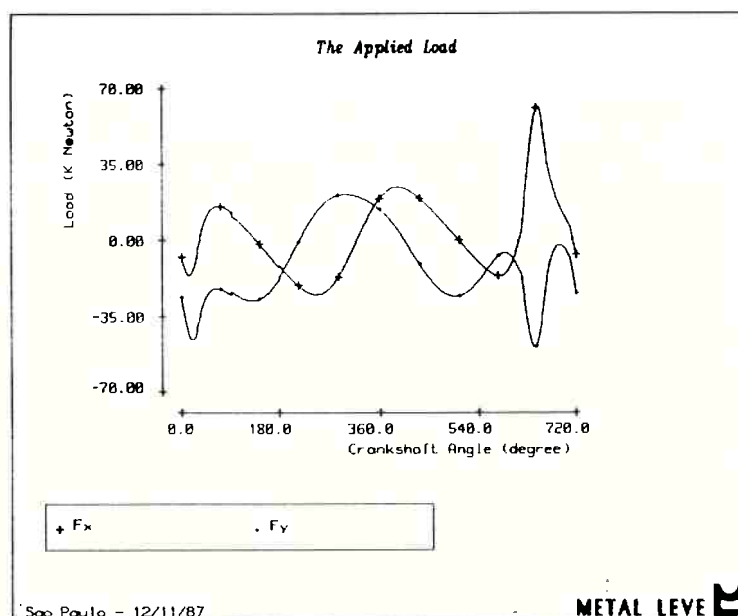


Fig. 8.1 - Carga Aplicada ao Mancal

### 8.1 - Parâmetros Operacionais de um Mancal Convencional

O programa LOCUS foi rodado para o mancal em questão e com o carregamento dado acima. A órbita do eixo é dada na figura 8.2.

A pressão máxima do filme de óleo, em função do ângulo no mancal, é dada na figura 8.3.

A espessura mínima do filme de óleo, em função do ângulo no mancal, é dada na figura 8.4.

O resumo das principais propriedades aparece na figura 8.5.

Pode-se verificar que a pressão máxima do filme de óleo foi 77,45 MPa e a mesma ocorreu a 225 graus do eixo y no mancal, quando o eixo do girabrequim estava em 648,34 graus (motor de quatro tempos).

A espessura mínima do filme de óleo foi 4,35 microns e a mesma ocorreu a 140 graus do eixo y no mancal, quando o eixo do girabrequim estava em 193,84 graus.

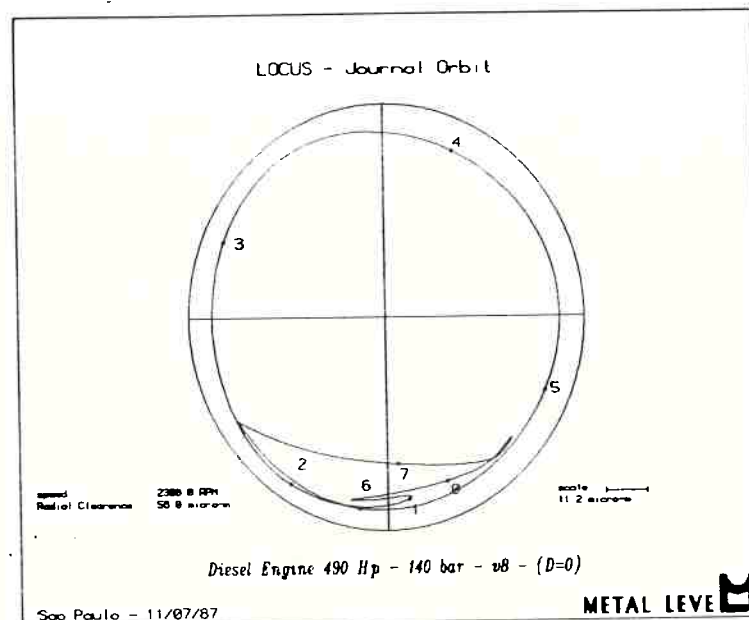


Fig. 8.2 - Órbita do Eixo

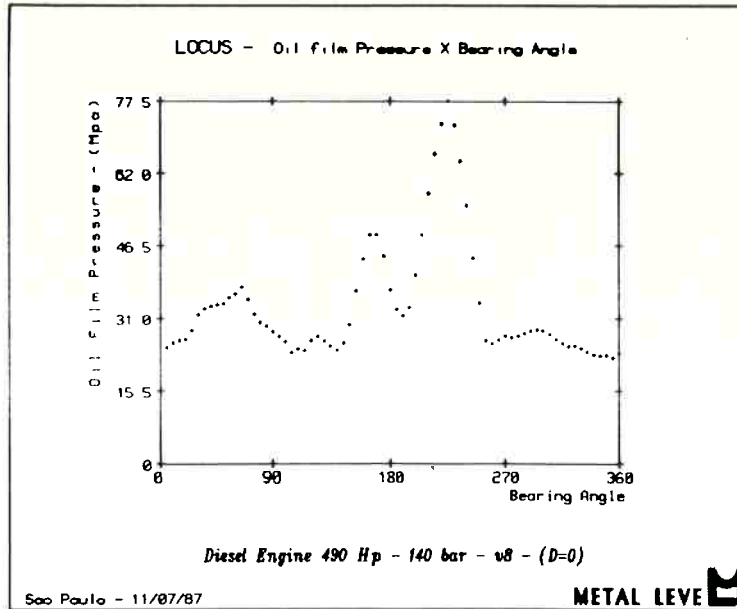


Fig. 8.3 - Pressão Máxima do Filme de Oleo em função do Angulo no Mancal

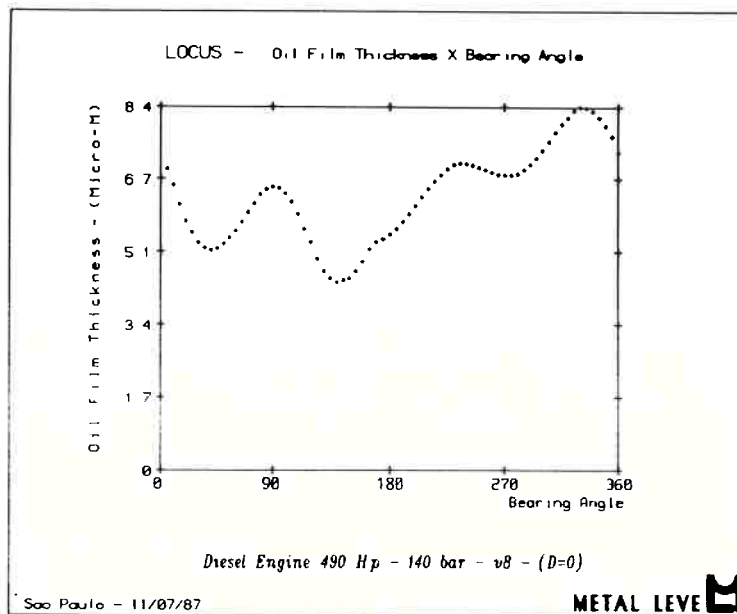



Fig. 8.4 - Espessura Mínima do Filme de Oleo em função do Angulo no Mancal

LOCUS - Summary of Results	
Peak Oil Film Pressure (Mpa)	77.45
Bearing Angle (Degree)	225.00
Crankshaft Angle (Degree)	648.34
<hr/>	
Min Oil Film Thickness (Micro-M)	4.35
Bearing Angle (Degree)	140.00
Crankshaft Angle (Degree)	193.84

*Diesel Engine 490 Hp - 140 bar - v8 - (D=0)*

Sao Paulo - 11/07/87 METAL LEVE 

**Fig 8.5 - Resumo das Principais Propriedades**

## 8.2 - Introdução de Perfilamento no Sentido Axial

Conforme já foi mencionado anteriormente, o campo de pressão gerado por um mancal hidrodinâmico tem perfis circunferencial e axial, como mostrado nas figuras 8.6a e 8.6b.

O valor da pressão de um mancal hidrodinâmico está relacionado inversamente à espessura do filme de óleo. Isto pode ser visto claramente, se considerarmos um mancal com canaleta central, conforme esquematizado na figura 8.7.

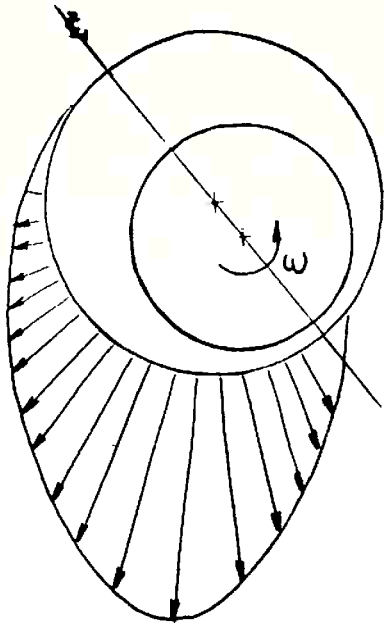


Fig. 8.6a - Campo de Pressão  
Circunferencial

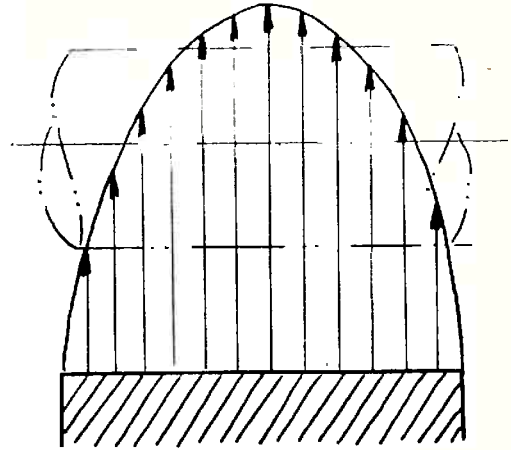


Fig. 8.6b - Campo de Pressão  
Axial

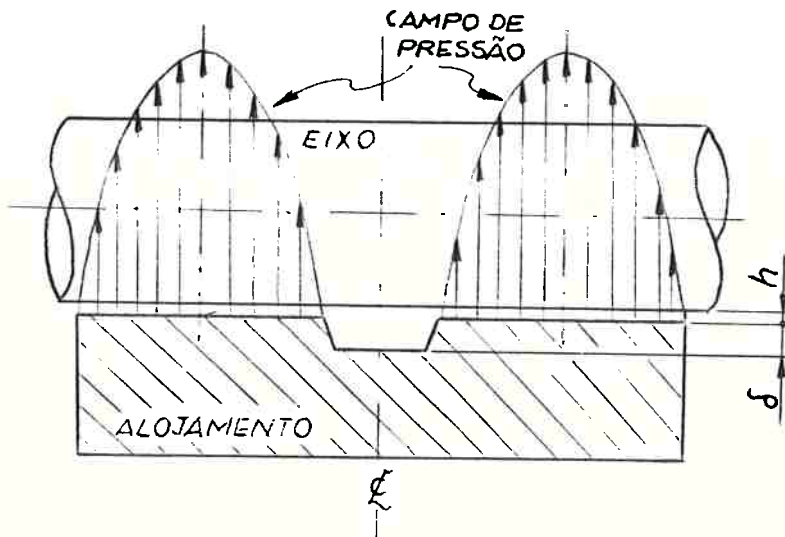


Fig. 8.7 - Mancal com Canaleta Central

Se a profundidade da canaleta ( $\delta$ ) for muito maior que a espessura do filme ( $h$ ), daí, então, o campo de pressão é nulo na região da canaleta e dois campos independentes são gerados no mancal.

Porém, a medida que  $\delta$  diminui, a espessura local ( $h + \delta$ ) pode ficar suficientemente pequena e começar a gerar pressão no local da canaleta.

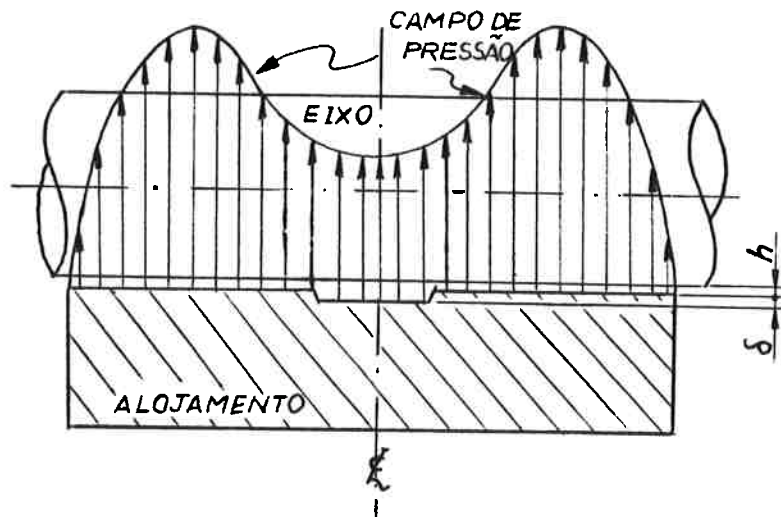


Fig. 8.8 - Campo de Pressão num Mancal com "Canaleta Rasa"

Seguindo a idéia acima, é possível introduzir modificações geométricas na superfície do mancal, de tal maneira a diminuir o valor da pressão máxima, mantendo a capacidade de carga.

Conforme pode ser visto na figura 8.6b, a pressão tem uma distribuição aproximadamente parabólica com um valor máximo no centro. Para "achatar" este campo de pressão, pode-se introduzir um perfilamento superficial que tenha uma profundidade maior no centro e profundidade nula nas bordas.



Adotou-se um perfilamento co-senoidal ("hour-glass"), que é descrito pela fórmula

$$\frac{\delta}{2} \left[ 1 - \cos \left( \frac{2\pi z}{L} \right) \right]$$

A geometria do perfilamento, dado pela fórmula acima, está esquematizada na figura 8.9.

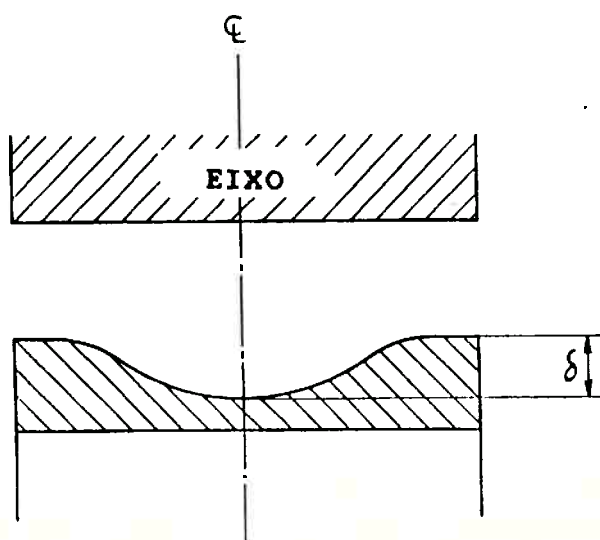


Fig. 8.9 - Perfilamento Superficial Co-senoidal

A introdução do perfilamento acima faz com que o valor máximo do campo de pressão diminua e, ao mesmo tempo, mantenha a capacidade de carga do mancal.

O programa LOCUS foi novamente usado para simular o mesmo mancal e com o mesmo carregamento, porém, agora, com perfilamento superficial.

A influência da introdução deste perfilamento superficial no campo de pressão pode ser visto na figura 8.10, onde  $d$  significa a profundidade máxima do perfilamento ( $\delta$ ), em porcentagem da folga radial.

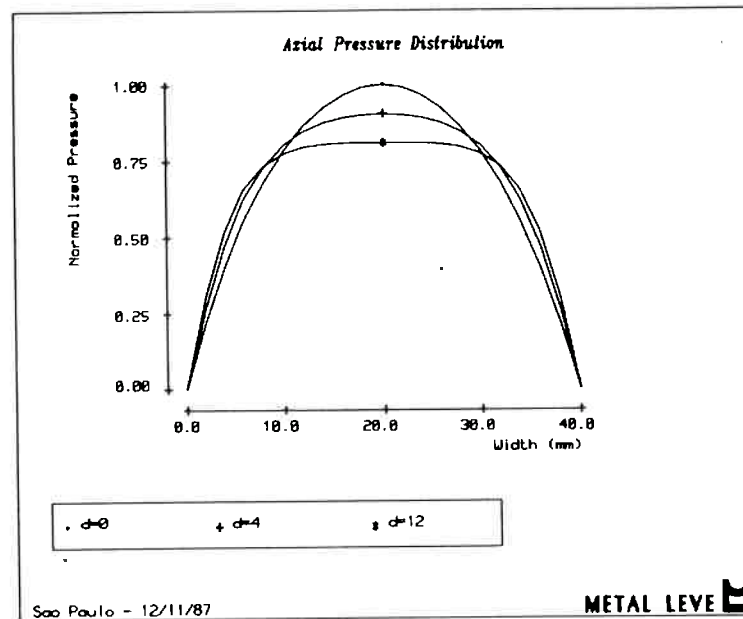


Fig. 8.10 - Campo de Pressão para alguns Valores de Profundidade do Perfilamento

Como pode se observar, o campo de pressão tende a ir de um formato aproximadamente parabólico para um formato mais retangular. Isto traz duas modificações evidentes, cujos efeitos serão analisados quantitativamente no próximo item: a pressão máxima diminui e o gradiente de pressão, nos contornos do mancal, aumenta.

### 8.3 - Resultado das Modificações Geométricas

Conforme explicado no item anterior, a pressão máxima hidrodinâmica diminui em função da profundidade do perfilamento. Isto pode ser visto, quantitativamente, na figura 8.11.

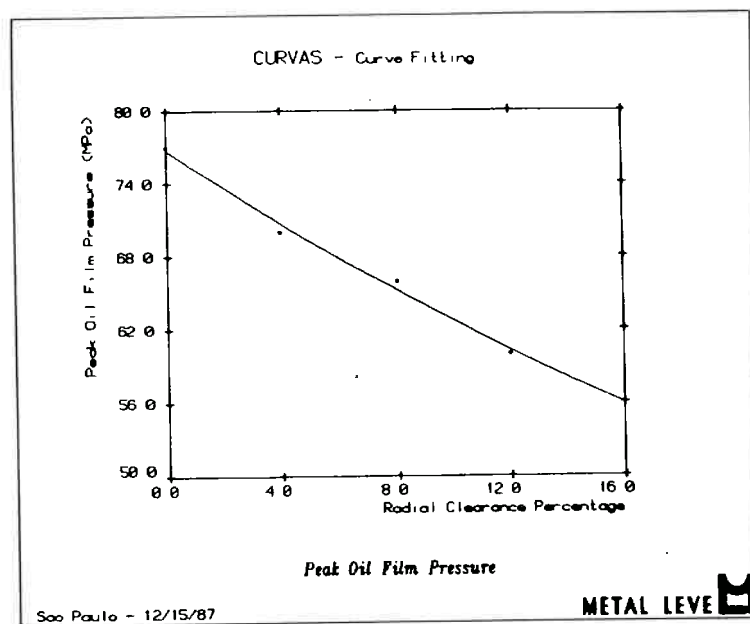


Fig. 8.11 - Pressão Máxima do Filme de Oleo versus Profundidade do Perfilamento

A pressão cai de 77,45 MPa para 57,00 MPa (uma redução de 26,48%). Esta redução é altamente significativa e extremamente benéfica uma vez que diminui consideravelmente a probabilidade de fadiga prematura no mancal.

A segunda consequência da introdução do perfilamento é uma vazão maior do fluido lubrificante. Esta vazão é devido aos altos gradientes de pressão na borda do mancal, visto que a vazão de óleo é função destes gradientes (vide equação 3.22).

A figura 8.12 mostra a variação da vazão de óleo, em função da profundidade do perfilamento. A vazão aumenta de 1,38 l/min para 1,53 l/min (um aumento de 10,87%).

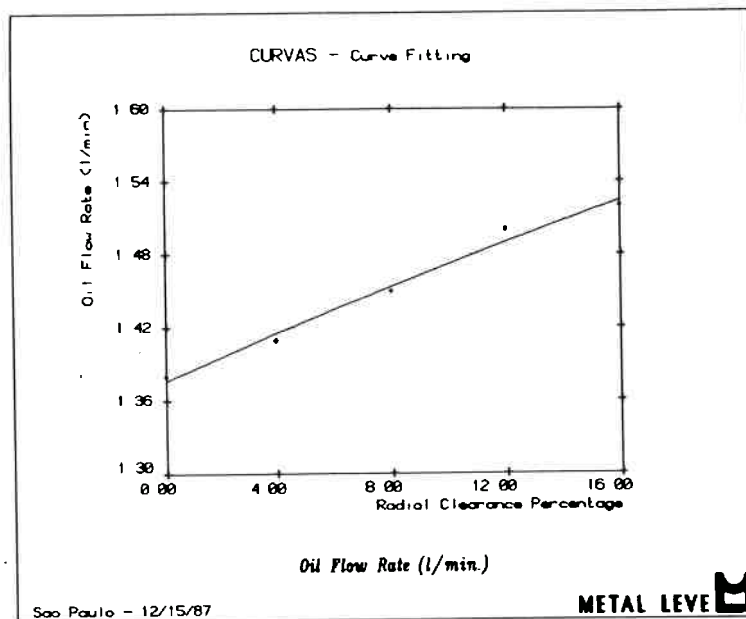


Fig. 8.12 - Vazão de Óleo em função da Profundidade do Perfilamento

Uma maior vazão de óleo traz dois benefícios ao mancal: primeiramente, abaixa a temperatura de funcionamento (o fluido age como refrigerante) e uma temperatura de funcionamento mais baixa é sempre desejável (diminui a probabilidade de fadiga, etc); o segundo, e principal benefício, de uma maior vazão de óleo é que com temperaturas mais baixas, a viscosidade do óleo aumenta e, em função disto, aumenta a capacidade de carga do mancal.

A terceira consequência da introdução do perfilamento é uma diminuição da espessura do filme.

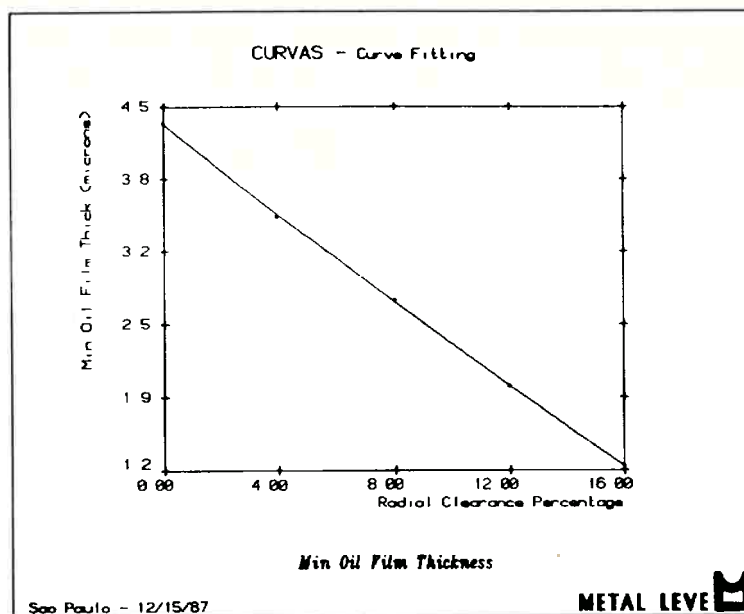


Fig. 8.13 - Espessura Mínima do Filme de Óleo em função da Profundidade do Perfilamento

A figura 8.13 mostra que a espessura do filme de óleo cai de 4,35 microns para 1,35 microns (uma redução de 68,96%). Certamente que esta consequência é prejudicial ao bom funcionamento do mancal, uma vez que espessuras de filme de óleo muito pequenas aumentam a probabilidade de contato eixo-mancal e podem aumentar o desgaste superficial do mancal. Devido a este fator, pode-se concluir que o conceito de perfilamento superficial de mancais só deve ser aplicado a mancais, cujas espessuras do filme de óleo não estejam próximas do limite crítico (20).

Na realidade, a redução da espessura do filme de óleo talvez não seja tão grande, porque com maior vazão de óleo, a temperatura de funcionamento irá diminuir, aumentando a viscosidade do óleo e consequentemente aumentando também a capacidade de carga do mancal, o que implicaria numa espessura de filme de óleo maior do que a que foi aqui calculada. Este contra-efeito não aparece nesta simulação, devido ao fato de ter sido usada uma viscosidade constante para este cálculo.

#### 8.4 - Limitações e Alternativas

Conforme pode ser verificado, a profundidade máxima de perfilamento usada no exemplo anterior é da ordem de 8 microns e este perfilamento provocou mudanças benéficas nas características operacionais do mancal. Para que estas vantagens se prolonguem durante a vida útil do mancal é necessário que o desgaste superficial do mesmo seja bem inferior à profundidade do perfilamento (8 microns).

Alguns tipos de mancais (por exemplo, Al - 20% Sn) têm desgaste superficial muito pequeno e, nestes mancais, o conceito de perfilamento co-senoidal pode ser aplicado.

Para mancais, cujo desgaste superficial é grande (maior que 5 microns), existem três alternativas que podem ser usadas para conseguir o mesmo efeito de perfilamento co-senoidal.

O primeiro conceito alternativo é o de micro-ranhas, igualmente espaçadas e com profundidade, conforme esquematizado na figura 8.14.

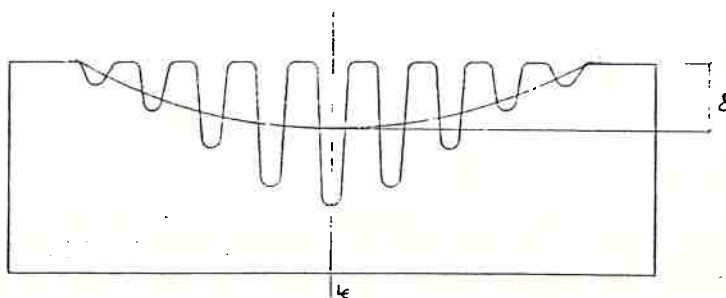


Fig. 8.14 - Distribuição de Micro-Ranhas

A profundidade de cada micro-ranhura varia com a posição, da mesma maneira que o perfilamento co-senoidal. Porém, a profundidade máxima das micro-ranhuras é significativamente maior que a profundidade do perfilamento co-senoidal, devido ao fato de que, neste caso, a porcentagem de área rebaixada é menor.

O gráfico da figura 8.15 mostra um campo axial de pressão "achatado" por uma distribuição de micro-ranhuras com espaçamento uniforme.

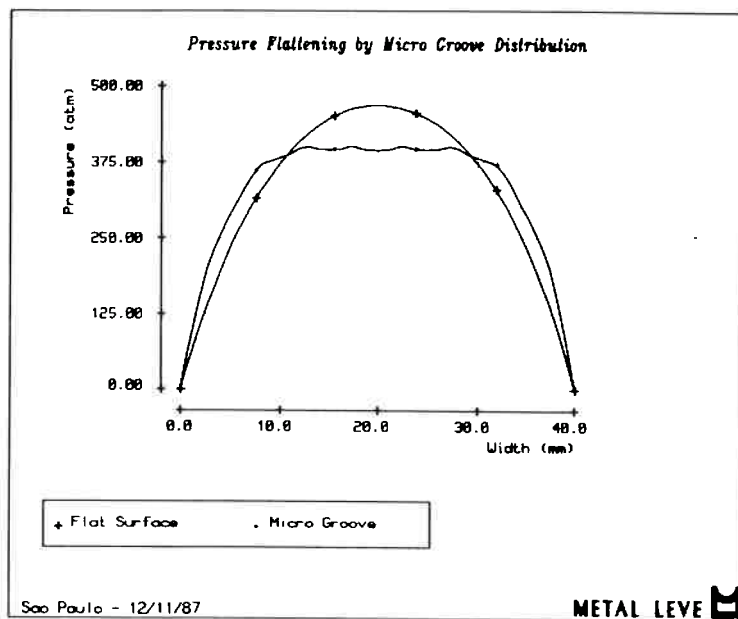


Fig. 8.15 - Campo de Pressão Axial gerado em uma Superfície de Micro-Ranhuras

A segunda alternativa, que pode ser usada em mancais com desgaste superficial excessivo, seria a usinagem de micro-ranhuras similares às apresentadas acima, porém, com profundidade constante e espaçamento variável. Através de uma condensação maior de micro-ranhuras no centro do mancal, o mesmo efeito de "achatamento" do campo de pressão pode ser obtido.

A terceira alternativa seria a usinagem de micro-ranhuradas no eixo do mancal. Estas micro-ranhuradas poderiam ter profundidade ou espaçamento variável, porém, a largura destas micro-ranhuradas seria bem pequena (da ordem de 200 microns), de tal maneira que a movimentação axial do eixo no mancal eliminaria a possibilidade de "crescimento" de superfícies convexas na superfície do mancal o que tenderia a eliminar o efeito benéfico das micro ranhuradas.

Baseado nos resultados expostos acima foi feito um pedido de patente, destes conceitos, perante o INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial). Este pedido está registrado no INPI sob o número PI-8800816.

O programa LOCUS, com tamanho de malha variável nas duas direções, pode ser usado para simular qualquer uma das alternativas aqui mencionadas.



## 9 - CONCLUSÃO e RECOMENDAÇÕES

O programa LOCUS, aqui apresentado, é uma ferramenta poderosa para projetistas de mancais de máquinas reciprocativas.

Normalmente, o que se usa para projetos de mancais, são programas baseados na teoria de Ockvirk (15), por serem consideravelmente mais simples de serem desenvolvidos e por usarem menos tempo de processamento (CPU). Porém, os resultados advindos desta teoria (Ockvirk) só são precisos dentro de certas faixas operacionais bastante restritas:

$$L/D < 1/3 \quad \text{e} \quad \epsilon < 0,9$$

Os mancais de motores de combustão interna, por sua vez, mesmo que tenham uma razão  $L/D < 1/3$ , operam geralmente com excentricidades bastante elevadas, acima de 0,95 ( $\epsilon > 0,95$ ).

Outra vantagem do programa LOCUS, aqui desenvolvido, é que o mesmo pode simular mancais radiais com qualquer tipo de geometria (não necessariamente cilíndrica). Esta flexibilidade não é possível através da teoria de Ockvirk.

Um estudo comparativo (30), mostrou que os resultados advindos da teoria de Ockvirk divergem da teoria bi-dimensional exponencialmente, em função do fator de excentricidade. Para um mancal com  $L/D = 1/3$  e  $\epsilon = 0,97$ , por exemplo, a diferença entre as espessuras de filme podem chegar a 300%, tomando-se, como referência, os resultados da teoria bi-dimensional.

O programa LOCUS, por sua vez, fornece resultados bastante precisos, uma vez que a equação de Reynolds é resolvida na sua íntegra. Os vários artifícios matemáticos aqui desenvolvidos, para refinar e diminuir a quantidade de cálculo, fizeram com que o programa LOCUS se tornasse viável de aplicação, em termos de tempo de processamento (CPU), num contexto industrial.

Atualmente, o programa LOCUS usa, aproximadamente, 2 horas de CPU no computador de pesquisa da Metal Leve (VAX 11/780) para fazer a simulação completa de um mancal.

Através da simulação da órbita do pino no cubo de um pistão foi possível demonstrar o real significado da eficiência dos alívios laterais, artifício amplamente usado, com sucesso, para evitar o surgimento de trincas na superfície do cubo. Com este estudo foi também possível mostrar que as pressões hidrodinâmicas que ocorrem no conjunto pino-cubo devem ser levadas em consideração, como condição de contorno, nas análises de distribuição de tensão do pistão, para que se possa prever com mais precisão a ocorrência de falhas prematuras na superfície do mesmo.

O conceito de perfilamento superficial de mancais, por sua vez, pode trazer uma série de benefícios operacionais ao mancal. Foi demonstrado aqui, através de simulações pelo programa LOCUS, que em um mancal convencional:

- ( i) A pressão máxima do filme de óleo caiu 26,48%
- ( ii) A vazão de óleo aumentou 10,87%
- (iii) A espessura mínima do filme de óleo foi reduzida em 68,96%

Os resultados acima mostram que este conceito de perfilamento superficial pode ser extremamente benéfico para mancais que tenham problema de fadiga prematura, devido à altas pressões do filme de óleo e que não tenham espessuras de filme muito baixas.

Neste trabalho foi demonstrado que é possível modificar o campo de pressão de um mancal hidrodinâmico no sentido axial e conseguir características operacionais desejáveis. O mesmo tipo de raciocínio pode ser usado para modificar o campo de pressão no sentido circunferencial do mancal. Várias patentes de mancais com modificações geométricas no sentido circunferencial foram requerida nos últimos anos (31), (UNEX, HIGHEX, DELTA WALL, etc.), na

maioria das vezes, essas modificações foram feitas baseadas em julgamento empírico e sentido comum e não em resultados de simulação do mancal sob condições reais de funcionamento. Com o auxílio do programa LOCUS é possível projetar mancais devidamente adaptáveis à cada aplicação ( sob medida ) desenvolvendo assim uma família de "super mancais" com características operacionais sensivelmente melhores.

Finalmente, deve-se mencionar que o programa LOCUS não leva em consideração possíveis deformações elásticas do alojamento . Para mancais com grandes deformações elásticas, os resultados do programa LOCUS serão apenas qualitativamente corretos, e nestes casos, resultados quantitativamente corretos só serão possíveis através de uma modelagem matemática baseada na teoria elasto-hidrodinâmica.

**APêNDICE: Listagem do Programa**

```

*****
*
* IDENTIFICACAO DO PROGRAMA *****
*
* (I) NOME DO PROGRAMA : L O C U S
*
* (II) CONSIDERACOES GERAIS :
*
* (1) METODOLOGIA DE CALCULO ...
*
* LOCUS RESOLVE A EQUACAO DE REYNOLDS BI-DIMENSIONAL,
* REGIME TRANSITORIO PELO METODO DAS DIFERENCAS FINITAS.
* O SISTEMA LINEAR RESULTANTE E RESOLVIDO PELO METODO
* ITERATIVO DE "SUCESSIVE OVER RELAXATION" (SOR).
*
* (2) PARAMETROS CALCULADOS ... [ f(t) ]
*
* (a) DISTRIBUICAO DE PRESSAO
* (b) PRESSAO MAXIMA
* (c) ESPESSURA MINIMA DO FILME DE OLEO
* (d) ANGULO DE CARGA
* (e) VAZAO DE OLEO
* (f) ORBITA DO EIXO
*
* (3) DADOS DE ENTRADA ...
*
* (a) CARGA APLICADA [ f(t) ]
* (b) FOLGA DIAMETRAL
* (c) ROTACOES POR MINUTO
* (d) DIMENSÕES DO MANCAL
* (e) VISCOSIDADE MEDIA DO OLEO
*
*****
*
* DESENVOLVIDO POR : Durval Duarte Junior
*
* GRUPO DE MODELAMENTO MATEMATICO E SIMULACAO
* GERENCIA TECNOLOGIA PROJETO E ANALISE
* METAL LEVE S.A INDUSTRIA E COMERCIO
* SAO PAULO, DEZEMBRO DE 1987.
*
*****
*
* DEFINICAO DAS VARIAVEIS *****
*
*
* EP ..... EXCENTRICIDADE
* RC ..... FOLGA RADIAL
* RPS ..... ROTACOES POR SEGUNDO
* RL ..... COMPRIMENTO DO MANCAL
* DD ..... DIAMETRO DO MANCAL
* RMI ..... VISCOSIDADE DO OLEO
* IT ..... NUMERO DE SUBDIVISOES DO EIXO X
* JT ..... NUMERO DE SUBDIVISOES DO EIXO Z
* KT ..... NUMERO MAXIMO DE ITERACOES ( SOR )
*

```

```

*      NITER ..... ANGULO DO GIRABREQUIM ( *100 )
*      DELTA ..... VALOR DO CRITERIO DE CONVERGENCIA
*      FORCAM ..... CARGA SUPORTADA PELO MANCAL
*      FDRCAC ..... CARGA IMPOSTA NO MANCAL
*      PHI ..... ANGULO DE CARGA
*      DELTAEP .... DELTA EXCENTRICIDADE
*      DALFA ..... DELTA ALFA
*      EPMAX ..... EXCENTRICIDADE MAXIMA ADMISSIVEL
*
***** IDENTIFICACAO DE MATRIZES *****
*
*      P(I,J,N) .. ..... PRESSAO TERMODINAMICA
*
*****
*
***** CARTAO DE IDENTIFICACAO *****
*
PROGRAM LOCUS
*
*****
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*      IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1      ALFA(72001),EPSOLDN(72001),DTIME(72001),ADDT(72001) ,
2      EDOT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3      ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4      PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5      h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCO3/HMIRIMC,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FCRCAM,FCRCAC
1      ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMO1,EPMIN,
2      EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DADDT,DECOT,DTT,DFRDE,
3      DFRDED,DFRDAD,CFTDE,DFTDED,DFTDAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4      AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5      HCRITICO,CALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,OFFR,TETAMIN,
6      SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*
COMMON/BLOCO4/IT,JT,KT,NT,NCONV,IORBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1      NGRBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2      ICLD,NITERF,ICLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*

```

```

*****
*
***** ABERTURA DE ARQUIVO PARA IMPRESSAO DE RESULTADOS NA IMPRESSORA *****
*
*****
*
      OPEN(UNIT=15,FILE="SAE.DAT",STATUS="NEW")
*
*****
*
***** APRESENTACAO DA TELA SELO DO PROGRAMA *****
*
*****
*
      CALL TELA
*
*****
*
***** INICIALIZA ALGUMAS CONSTANTES DO SIMULADOR *****
*
*****
*
      call problema
      CALL DADOS
*
*****
*
S      CONTINUE
*
*****
*
***** INICIALIZA DADOS DO PROBLEMA *****
*
*****
*
      CALL PROBLEMA
*
*****
*
** VERIFICA TIPO DE OPERACAO DESEJADA PARA DEFINICAO DA CARGA APLICADA **
*
*****
*
      CALL TIPOP(iCAR)
*
*****
*
      IF (iCAR.EQ.1) THEN
*
*****
*
***** LE ARQUIVO DE CARGAS APLICADA *****
*
*****
*
      CALL LECARG
*
*****
*
      ELSE

```

```

*
*****
*
***** UTILIZACAO DE CARGAS APLICADAS ATRAVES DE CALCULO *****
*
*****
*
CALL CALCAR
*
*****
*
ENDIF
*
*****
*
***** ATRIBUI VALORES PARA CARGA E ANGULO DE CARGA DE GRAU EM GRAU *****
*
*****
*
CALL EXPLODE
*
*****
*
111 continue
*
*****
*
***** INCREMENTA ORBITA *****
*
*****
*
iorbita=iorbita+1
*
*****
*
***** INICIALIZA VALORES DA ORBITA *****
*
*****
*
CALL INICOR
*
*****
*
3 CONTINUE
*
*****
*
***** GUARDA VALORES DO PASSO ANTERIOR *****
*
*****
*
CALL CLD(ICAR)
*
*****
*
sk=0.
*
*****
*
do 7 nalfa=1,nalfat

```





```

*****
*
7      continue
*
*****
*
***** VERIFICACAO DE CONVERGENCIA *****
*
*****X
*
      call testconv(ijklmn)
      IF(NITER2.LE.1000) IJKLMN=0
*
*****
*
11     continue
*
*****
*
***** IMPRESSAO PARCIAL DE RESULTADOS *****
*
*****
*
      call print (ijklmn,sk,icar)
*
*****
*
***** SE NAO CONVERGIU DA MENSAGEM E DIMUNUI PASSO *****
*
*****
*
      if(ijklmn.eq.1) then
          call dpasso
          goto 1000
      endif
*
*****
*
***** SE HOUVE CONVERGENCIA AUMENTA O PASSO *****
*
*****
*
      if(iorbita.eq.(norbita+1))CALL PESAN
*
*****
*
      call zpasso(delconv,dalconv,inconv)
*
*****
*
***** CARREGA VETORES PARA PLOTAGEM DE GRAFICO *****
*
*****
*
      call grafico
*
*****
1000   CONTINUE
*
*****

```

```

*****
*
***** CHUTE INICIAL DO VALOR DA PERTUBACAO *****
*
*****
*
      call chute(dalconv,dalconv,inconv,icar)
*
*****
*
***** VERIFICA SE E FIM DA SIMULACAO *****
*
*****
*
      if(niter2.gt.(norbite+1)*720*100)then
*
*****
*
***** FIM DA SIMULACAO - PLOTA ORBITA DA EXCENTRICIDADE E *****
*
***** RESUMO DOS RESULTADOS *****
*
*****
*
      call diagrama(2,0)
      call resumo(icar)
*
*****
*
***** SOLICITA OPCAO DO USUARIO *****
*
*****
*
      8
      continue
*
*****
*
      call termino(ijk)
*
*****
*
***** VERIFICA OPCAO ESCOLHIDA PELO USUARIO *****
*
*****
*
      if(ijk.eq.0) then
        call mensag
        close(unit=20)
        close(unit=15)
        stop
      endif
*
*****
*
      if(ijk.eq.1) then
        close(unit=20)
        goto 5
      endif
*
*****

```

```

*
*           if(ijk.eq.2) call diagrama(ijk,1)
*
*****
*
*           if(ijk.eq.3) call resumo(icar)
*
*****
*
*           if(ijk.eq.4) then
*             call mensag
*             close(unit=20)
*             close(unit=15)
*             i=lib$spawn('print SAE.dat/notify')
*             stop
*           endif
*           goto 8
*
*****
*
*           endif
*
*****
*
***** VERIFICA SE E FIM DA ORBITA *****
*
*****
*
*           if(niter.lt.72001)goto 3
*
*****
*
***** INICIA NOVA ORBITA *****
*
*****
*
*           goto 111
*
*****
*
*           END
*
*****
*
***** FIM DO PROGRAMA PRINCIPAL
*
*****
*
*           SUBROUTINE TIPOP(1CAR)
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*
*           IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
*
*****

```

```

***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
*
COMMON/BLOC01/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1 ALFA(72001),EPSOLON(72001),DTIME(72001),ADOT(72001) ,
2 EDDT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3 ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4 PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5 h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
COMMON/BLOC02/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
COMMON/BLOC03/HMINIMO,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1 ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMO1,EPMIN,
2 EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,CADOT,DEGOT,DTT,DFRDE,
3 DPROED,DFRDAD,DFTOE,DFTDED,DFTDAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4 AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5 HCRITICO,DALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6 SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*
COMMON/BLOC04/IT,JT,KT,NT,NCONV,IORBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1 NDRBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPDNTOS,NPDNTOS1,NITER2,
2 IOLO,NITERF,IOLO1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*
WRITE(6,1234)
1234 FORMAT(5X," ENTRE COM :",/,22X,"1- PARA LER CARGAS DO LOAD",//,
1 22X,"2- PARA CALCULAR CARGAS")
*
*****
*
WRITE(15,1234)
*
*****
*
5 continue
READ(5,6789) ICAR
6789 FORMAT(I1)
*
*****
*
WRITE(15,*) ICAR
*
*****
*
IF(ICAR.LT.1.OR.ICAR.GT.2) THEN
*
*****
*
WRITE(6,1235)
1235 FORMAT(5X," VALOR DIGITADO ESTA INCORRETO - REENTRE ",
1 "ESSE DADO")

```

```

*
*****
*
      WRITE(15,1235)
*
*
      GOTO 5
      ENDIF
*
*****
*
      WRITE(20,1021)ICAR
1021  FORMAT(12,/)
*
*****
*
***** VERIFICA SENTIDO DA ROTACAO DO IEXO *****
*
*****
*
      IF(ICAR.EQ.1)THEN
          SINA = -1
          GOTO 9000
      ENDIF
*
*****
*
      WRITE(6,3333)
3333  FORMAT(/,5X," SENTIDO DA ROTACAO : +1 PARA ANTI-HORARIO",/,
1      5X,"
          -1 PARA HCRARIO")
*
*****
*
      WRITE(15,3333)
*
*****
*
3335  CONTINUE
*
*****
*
      READ(5,*)SINA
      WRITE(15,*)SINA
*
*****
*
      IF(SINA.NE.1.AND.SINA.NE.-1)THEN
          WRITE(6,1235)
          WRITE(15,1235)
          GOTO 3335
      ENDIF
*
*****
*
9000  CONTINUE
*
*****
*
      WRITE(20,1020)

```

```

1020  FORMAT(1X,'ANG.GIRABREQUIM',T19,'EXCENTRICIDADE',T40,
      1      'ALFA',T50,'PRESSAO MAXIMA',T69,'HMINIMO')
*
*****
*
      RETURN
      END
*
*****
*
***** FIM DA SUBROUTINE
*
*****
*
      SUBROUTINE LECARG
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
*
*****
*
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
*
      COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1      ALFA(72001),EPSOLON(72001),DTIME(72001),ADOT(72001),
2      EDOT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001),
3      WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4      PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5      h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
      COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
      COMMON/BLOCO3/HMINIMO,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAM,FCRCAC
1      ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMO1,EPMIN,
2      EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DADG1,DECOT,DTT,DFRCE,
3      DFRDED,DFRDAD,DFRCE,DFRDED,DFRCAD,DTEMPD,SN,CARGAMAX,
4      AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELTA,DELR,
5      HCRITICO,DALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,DFRR,TETAMIN,
6      SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*
      COMMON/BLOCO4/IT,JT,KT,NT,NCONV,IORBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1      NORBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2      IGLD,NITERF,IGLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*
      OPEN(UNIT=10,FILE='CARGAS.DAT',STATUS='OLD')

```

```

*
*****
*
***** VERIFICA QUAL E O ARQUIVO DESEJADO *****
*
*****
*
      WRITE(6,1235)
1235  FORMAT(6X,'ENTRE COM : ',//,
1      22X,'0  PARA BB',//,
2      22X,'1  PARA BC1',//,
3      22X,'2  PARA BC2',//,
4      22X,'3  PARA BC3',//,
5      22X,'   ....',//,
6      22X,'   ....',//,
7      22X,'N  PARA BCN',//)
*
*****
*
      WRITE(15,1235)
*
*****
*
      READ(5,*)IBC
*
*****
*
      WRITE(15,*)IBC
*
*****
*
***** LE ARQUIVO SOLICITADO *****
*
*****
*
      DO 10 I=1,720
          IF(IBC.EQ.0.0)THEN
              READ(10,9999)CARGAM(I),PSIM(I)
9999      FORMAT(10X,2F10.2)
          ELSE
              READ(10,9998)CARGAM(I),PSIM(I)
9998      FORMAT(40X,<2*(IBC-1)*10>X,2F10.2)
          ENDIF
*
*****
*
***** TRANSFORMA UNIDADES E ACHA CARGA MAXIMA *****
*
*****
*
          CARGAM(I)=4.4482 * CARGAM(I)
          IF(DABS(CARGAM(I)).GT.CARGAMAX) CARGAMAX = DABS(CARGAM(I))
          PSIM(1) = SINA*(-PSIM(I)*PI/180.0)
*
*****
*
10      CONTINUE
          CARGAM(721) = CARGAM(1)
          PSIM(721) = PSIM(1)
*
*****

```



```

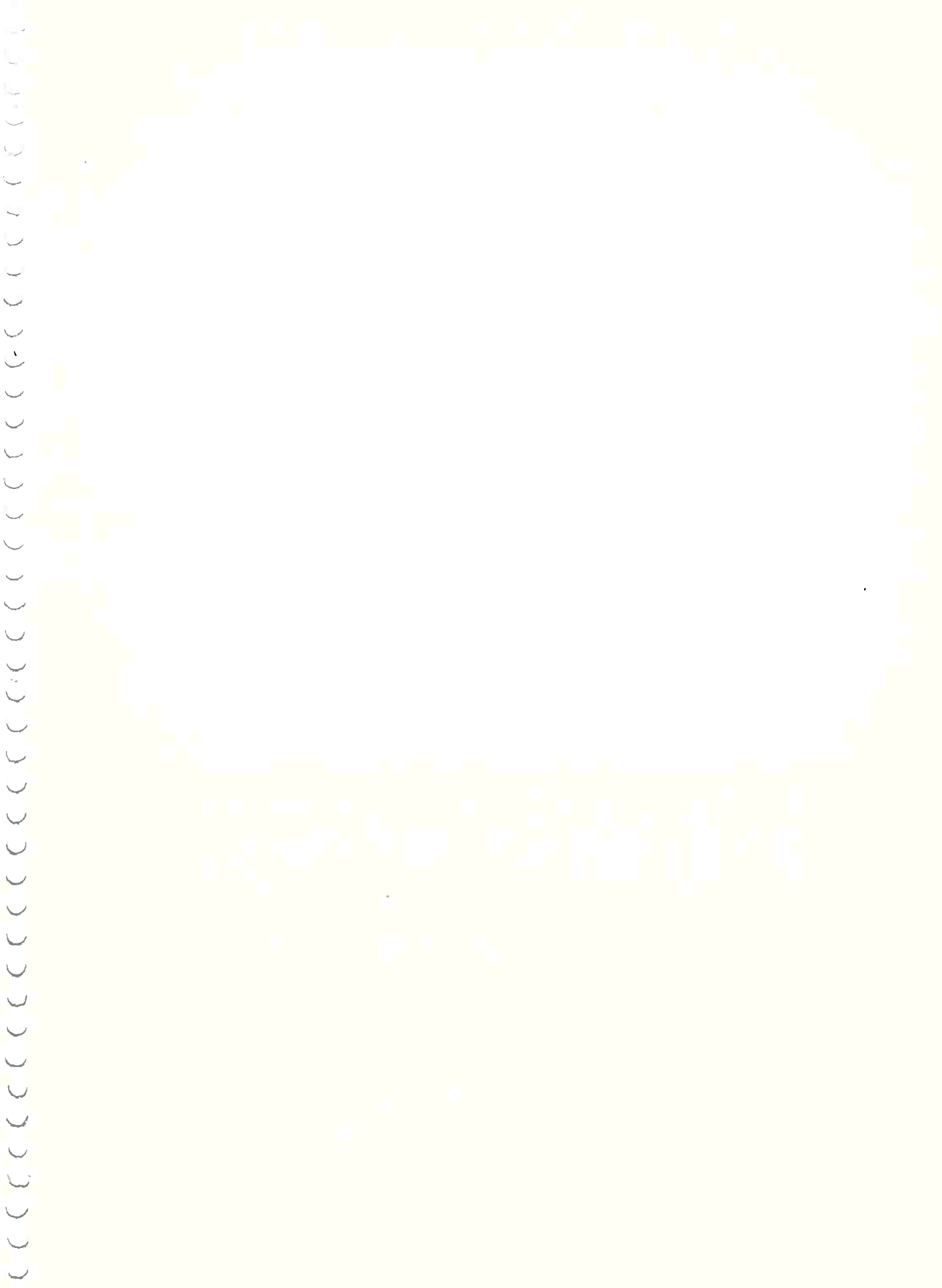
*****
*
*       RETURN
*       END
*
***** FIM DE SUBROTINE
*
*       SUBROTINE CALCAR
*
*****
***** DECLARACAO DE VARIABEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*       IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
*
*****
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*       COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1         ALFA(72001),EPSOLON(72001),DTIME(72001),ADOT(72001) ,
2         EDOT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3         ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4         PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5         h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*       COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*       COMMON/BLOCO3/HMINIMO,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1         ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMO1,EPMIN,
2         EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DADOT,CEGOT,DTT,DFRDE,
3         DFRDED,DFRDAD,DFTDE,DFTDED,DFTCAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4         AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5         HCRITICO,DALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6         SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*       COMMON/BLOCO4/IT,JT,KT,NT,NCONV,IGRBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1         NORBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2         IOLD,NITERF,IOLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*       DD 2 I=1,721
*       TETA = DFLOAT(I-1)*PI/360.0
*
*****
***** CALCULA CARGA APLICADA *****

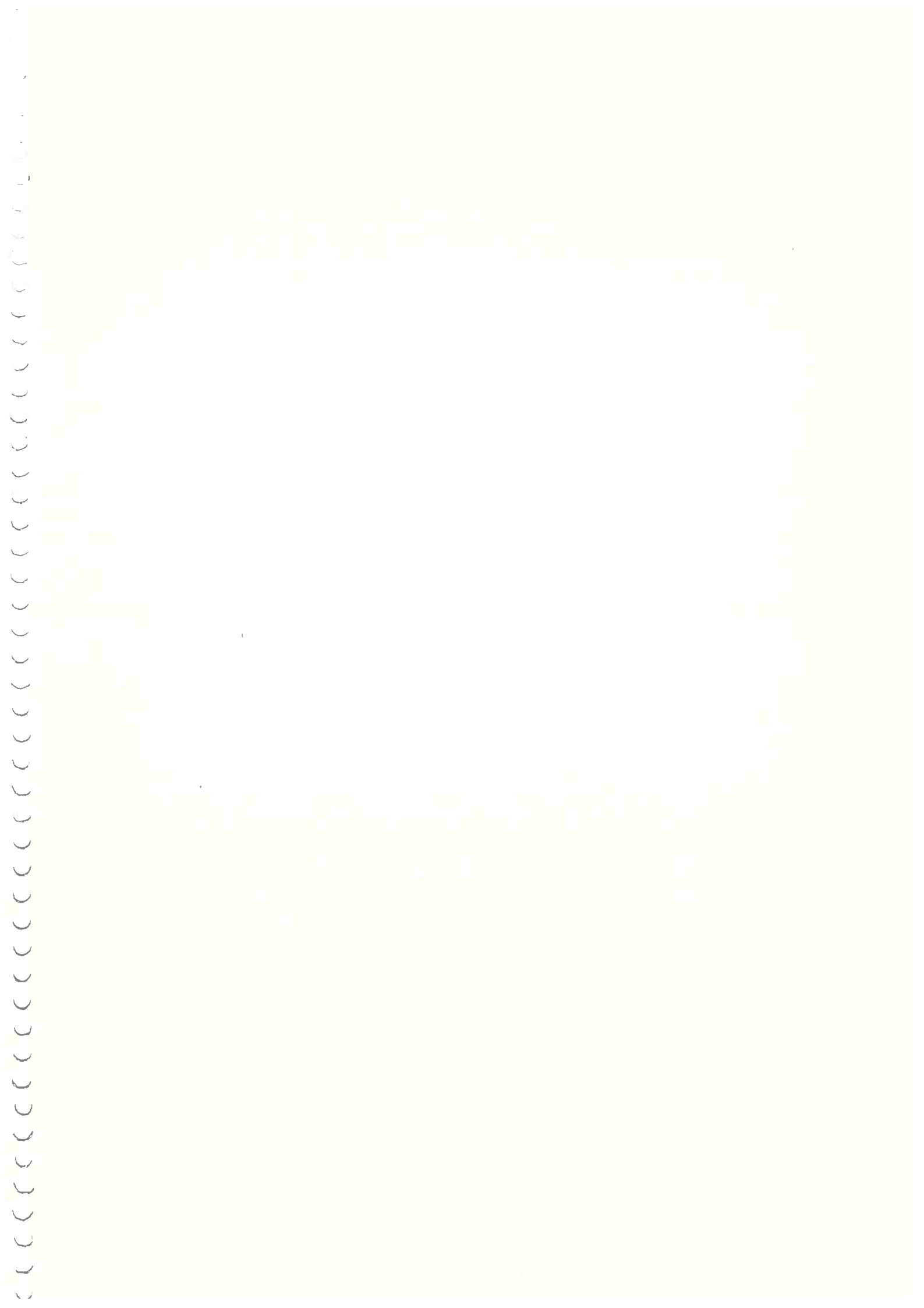
```

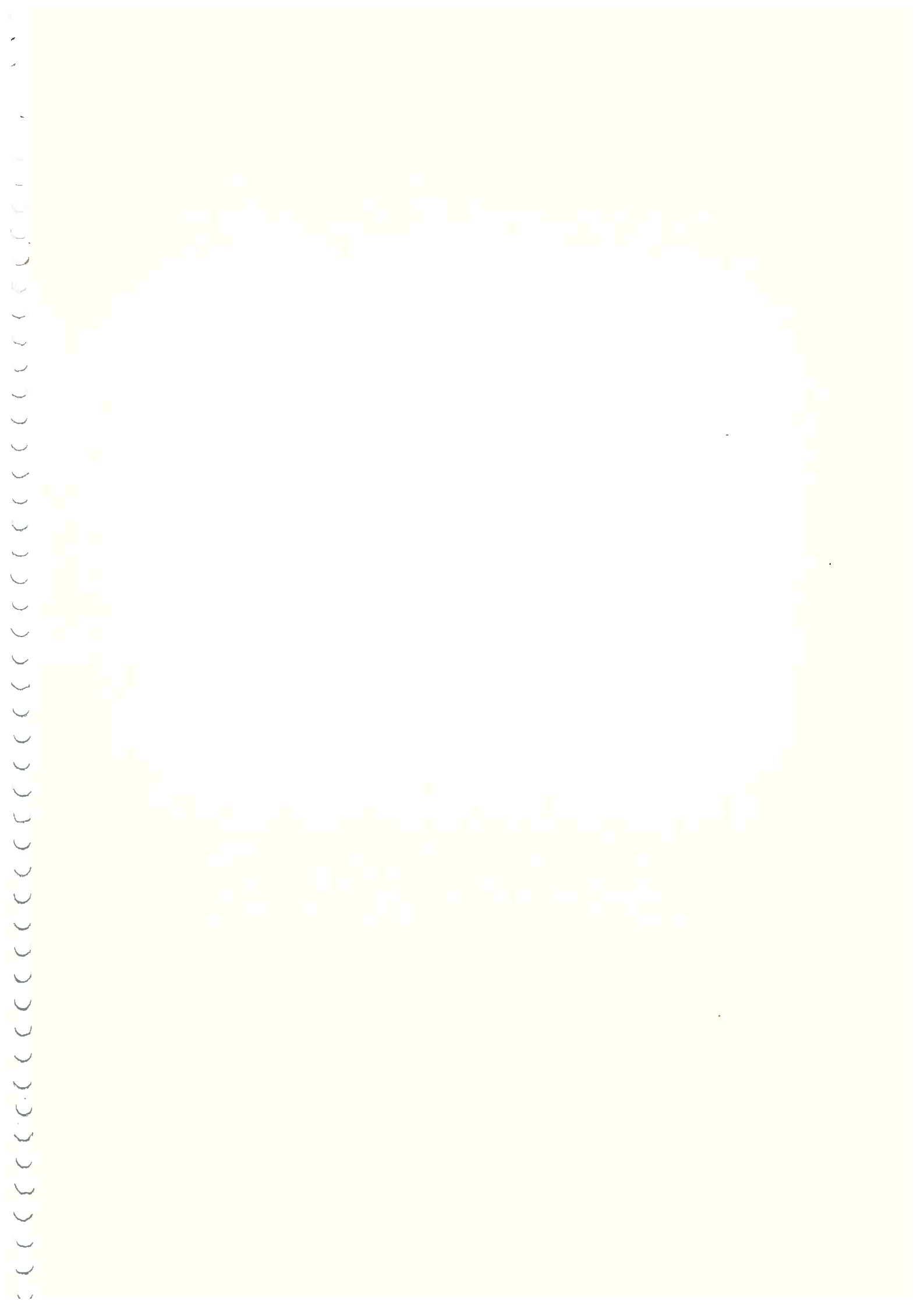
```

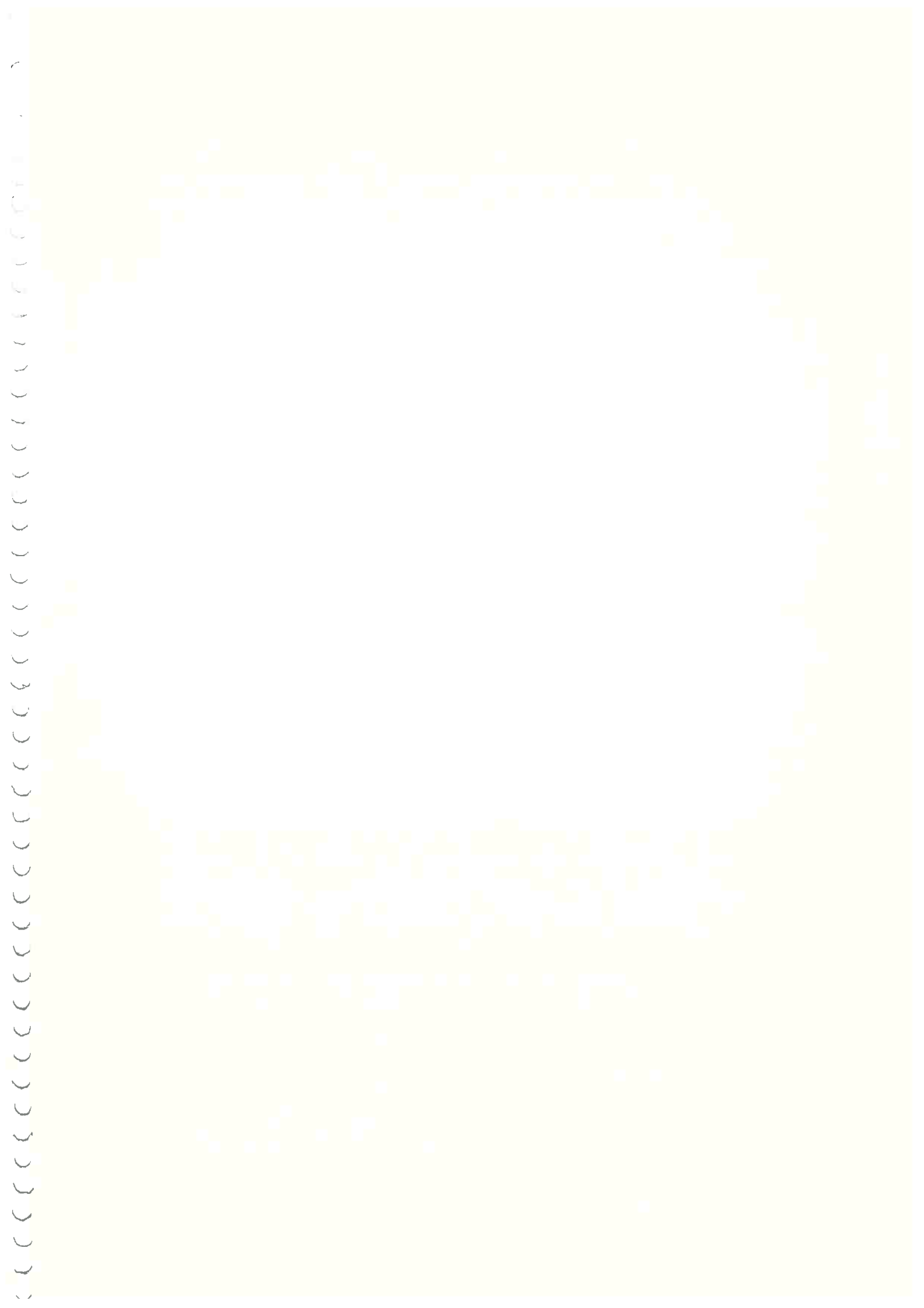
*
*****
*
      CARGAM(I) = 38000.0 * DSIN(TETA)
      PSIM(I) = 0.
      IF(CARGAM(I).LT.0.) THEN
          CARGAM(I) = - CARGAM(I)
          PSIM(I) = PSIM(I) + PI
      ENDIF
*
*****
*
***** DEFINE CARGA MAXIMA APLICADA *****
*
      IF(CARGAM(I).GT.CARGAMAX) CARGAMAX = CARGAM(I)
*
*
2      CONTINUE
*
*
      RETURN
      END
*
***** FIM DE SUBROTINE *****
*
*
SUBROTINE EXPLDDE
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIABEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
*
*
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*
      COMMON/BLOCCD1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1      ALFA(72001),EPSOLDN(72001),DTIME(72001),ADDT(72001),
2      EDDT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3      ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4      PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5      h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*
*****
*
      COMMON/BLOCCD2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*

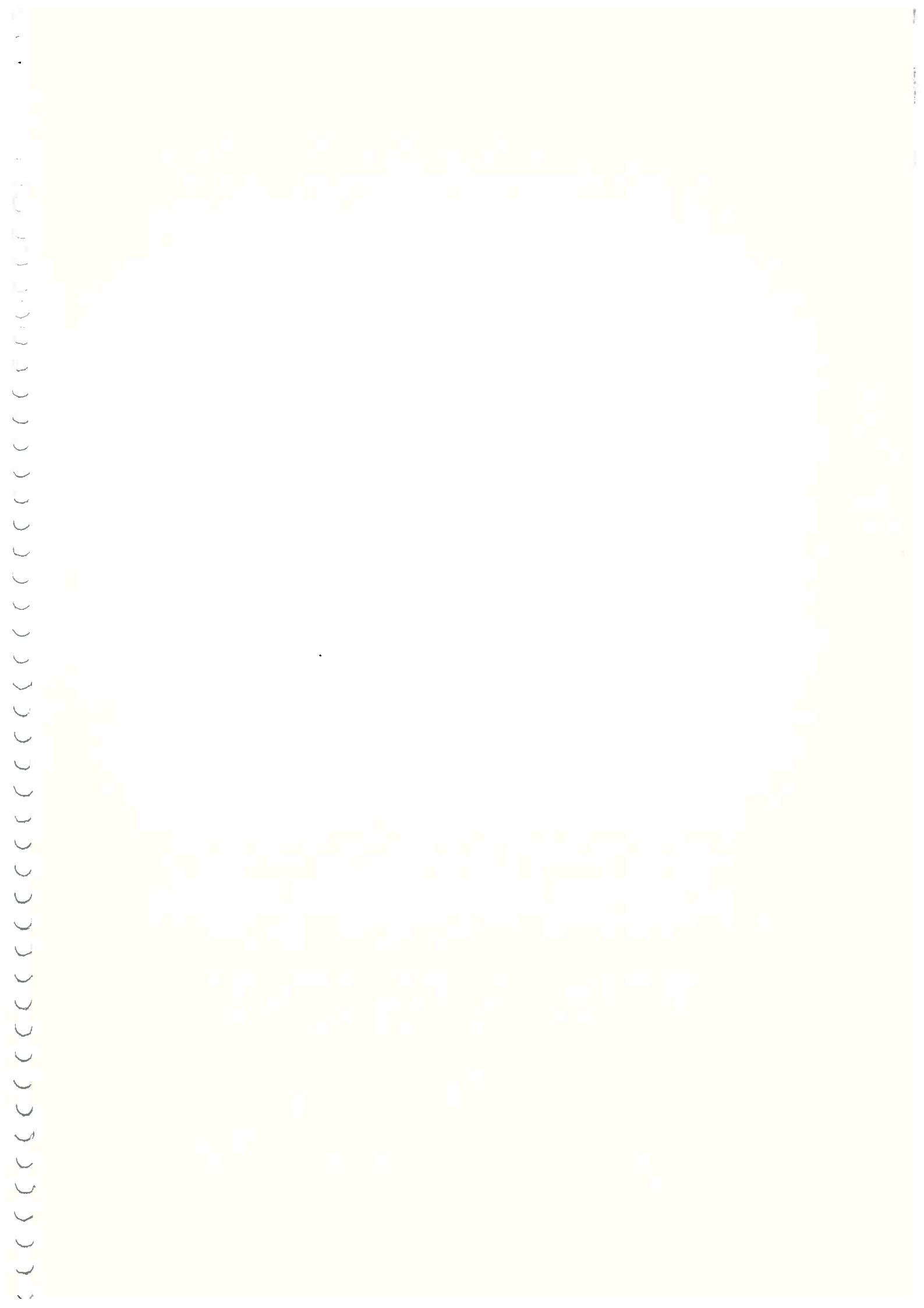
```











```

COMMON/BLOC03/HMINIMO,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1      ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMA1,HMINIMO1,EPMIN,
2      EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMA,CAOT,DECOY,DTT,DFRDE,
3      DFRDED,DFRDAD,DFIDE,DFTDED,DFTDAD,OTEMPO,SN,CARGAMAX,
4      AL,TETAMAX1,ANGPMA,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5      HCRITICO,CALMAX,DHAX,TETAPMAX,DFT,UFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6      SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*
COMMON/BLOC04/IT,JT,KT,NT,NCONV,IORBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1      NORBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2      IOLD,NITERF,IOLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*
***** INTERPOLA LINEARMENTE CALCULANDO A CARGA APLICADA E O *****
*
***** DE CENTESIMO EM CENTESIMO DE GRAU *****
*
*****
*
DO 6 I=1,720
DO 6 J=1,100
K=(I-1)*100+J
IF(CARGA(K).EQ.0.)THEN
DUMMY=(CARGAM(I+1)-CARGAM(I))/100.0
CARGA(K) = CARGAM(I) + DFLOAT(J)*DUMMY
DUMMY=(PSIM(I+1)-PSIM(I))/100.0
PSI(K) = PSIM(I)+DFLOAT(J)*DUMMY
ENDIF
*
*****
*
***** DEFINE AS CARGAS APLICADAS EM X E Y *****
*
*****
*
WX(K)=-DSIN(PSI(K))*CARGA(K)
WY(K)= DCOS(PSI(K))*CARGA(K)
*
*****
*
6      CONTINUE
*
*****
*
CARGA(72001)=CARGA(1)
PSI(72001) = PSI(1)
WX(72001) = wx(1)
WY(72001) = wy(1)
*
*****
*
***** CALCULO DE VALORES INICIAIS DE EPSOLON E ALFA *****
*
*****
*
EPSOLON ( 72001) = 0.50
ALFA(72001) = PSI(72001)+PI

```



```

AL = ALFA(72001)
*
*****
*
***** FORCA HIDRODINAMICA TANGENCIAL E RADIAL CALCULADA *****
*
*****
FHT(72001) = (WX(1)*DCOS(AL)+WY(1)*DSIN(AL))
FHR(72001) = (-WX(1)*DSIN(AL)+WY(1)*DCOS(AL))
*
*****
*
RETURN
END
*
*****
***** FIM DE SUBROUTINE *****
*
SUBROUTINE INICDR
*
*****
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1 ALFA(72001),EPSOLON(72001),DTIME(72001),ADGT(72001),
2 EDOT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3 ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4 PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5 h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
COMMON/BLOCO3/HMI:IMO,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FCRCAH,FCRCAC
1 ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMIKIMO1,EPMIN,
2 EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DADOT,DEDOT,DTT,DFRDE,
3 DFRDED,DFRDAD,DFTDE,DFTDEC,DFTDAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4 AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5 HCRITICO,CALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6 SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****

```

```

*
COMMON/BLOC04/IT, JT, KT, NT, NCONV, IORBITA, INCTETA, NALFA, NITER,
1 NORBITA, INCMIN, INCMAX, NUMERO, NPONTOS, NPONTOS1, NITER2,
2 IOLD, NITERF, IOLD1, NITER1, NALFAT, NPASSO, IDEF
*
*****
*
***** LIMPA VETORES E INDICE UTILIZADOS NA GERACAO DO GRAFICO *****
*
*****
*
      NPONTOS = 0
*
*****
*
      DO 10 I= 1,10000
        X(I) = 0.0
        Y(I) = 0.0
10  CONTINUE
*
*****
*
      ANGPMAX = 0.
      PMAX1 = 0.0
      HMINIMO1 = 100.0
*
*****
*
***** DEFINE VALORES INICIAIS *****
*
*****
      EDOT(1) = EDOT(72001)
      ADDT(1) = ADDT(72001)
      FHT(1) = FHT(72001)
      FHR(1) = FHR(72001)
      EPSOLON(1) = EPSOLON(72001)
      ALFA(1)=ALFA(72001)
*
*****
*
      AL = ALFA(1)
      IOLD = 1
      NITER = 1
      NITERF = 10
*
*****
*
      RETURN
      END
*
*****
*
***** FIM DE SUBROUTINE *****
*
*****
*
      SUBROUTINE TERMINO(IJK)
*
*****

```

```

*
*
***** DECLARACAO DE VARIABEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*
      IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
*
***** IDENTIFICACAO DO PROGRAMA *****
*
*
      ESTA SUBROUTINE PERGUNTA AO USUARIO SE DESEJA RODAR
      NOVAMENTE O PROGRAMA
*
*****
*
***** IDENTIFICACAO DAS VARIABEIS *****
*
*
      IJK ..... UM "FLAG" QUE ASSUME O VALOR DE 1 SE O USUARIO
      DESEJAR RODAR NOVAMENTE O PROGRAMA
*
*****
*
      IJK=0
*
*****
*
      WRITE(6,300)
300      FORMAT(20(/),10X,"      DIGITE .....",//,
           1          10X,"      0 para terminar",/
           2          10X,"      1 para continuar",/,
           3          10X,"      2 para grafico da orbita",/,
           4          10X,"      3 para resumo dos resultados",/,
           5          10X,"      4 para resultados gerais na
           6          ,      "impressora",5(/))
*
*****
*
      WRITE(15,300)
*
*****
*
102      CONTINUE
      READ(5,*)IJK
*
*****
*
      WRITE(15,*)IJK
*
*****
*
      IF(IJK.LT.0.OR.IJK.GT.4)THEN
*
*****
*

```

```

WRITE(6,101)
WRITE(15,101)
101  FORMAT(10X,"VALOR FGRA DOS LIMITES - REENTRE ESSE DADO")
      GOTO 102
      ENDIF
*
*****
*
      RETURN
      END
*
*****
*
***** FIM DA SUBROUTINE
*
*****
*
      SUBROUTINE DADOS
*
*****
*
      ESTA SUBROUTINE CONTEM ALGUMAS CONSTANTES UTILIZADAS PELO
*
      PROGRAMA   SAE
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
*
*****
*
***** ALOCAÇÃO DE MEMORIA *****
*
*****
*
      COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1      ALFA(72001),EPSOLGN(72001),DTIME(72001),ADOT(72001),
2      EDOT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001),
3      WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4      PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5      h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
      COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
      COMMON/BLOCO3/HMINIMO,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1      ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMO1,EPMIN,
2      EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,GADOT,DEDOT,DTT,DFRDE,
3      DFRDED,DFRDAD,DFTDE,DFTDED,DFTCAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4      AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5      HCRITICO,CALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6      SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****

```

```

*****
*
COMMON/BLDC04/IT,JT,KT,NT,NCONV,IORBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1   NDRBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2   ICLD,NITERF,ICLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*
***** valor de pi *****
*
pi=3.14159265358979
*
*****
*
***** NUMERO DE SUBDIVISOES DOS EIXOS X E Z *****
*
IT=37
JT=11
*
*****
*
***** definicao dos incrementos espaciais *****
*
write(6,15)
15  format(5(/),
1   " profundidade da ranhura ",//)
read(5,*) ddh
ddh=ddh*1.0E-6
WRITE(6,17)
17  format(5(/),
1   " LARGURA DA RANHURA ( MM )",//)
READ(5,*) RLR
RLR=0.5*RLR*1.0E-3
xx=0.
do 10 i=1,it
dx(i)=2.0*pi*rr/dfloat(it-1)
if(i.eq.1) dx(i)=0.
xx=xx+dx(i)
teta=xx/rr
z1=0.
do 10 j=1,jt
dz(j)=0.5*r1/dfloat(jt-1)
if(j.eq.1) dz(j)=0.
z1=z1+dz(j)
IF(Z1.LT.RLR) THEN
dn(i,j)=DDH
ELSE
DH(I,J)=0.
ENDIF
h(i,j)=rc*(1.0+ep*dcos(teta))+dh(i,j)
WRITE(6,*) I,J,DH(I,J)
10  continue
*
*****
*
***** # MAXIMO DE ITERACOES E CRITERIO DE CONVERGENCIA *****
*
*****

```

```

*
*          KT=1000
*          DELTA=1.0e-3
*
*****
*
***** INCREMENTO MAXIMO DO ANGULO ALFA *****
*
*****
*
*          DALMAX= 0.1*pi
*          DMAX= 0.1
*
*****
*
***** DEFINICAO DE CONSTANTES AUXILIARES *****
*
*****
*
*          NORBITA = 2
*          SN=1.0E-20
*
*****
*
***** TAMANHO MAXIMO E MINIMO DO INCREMENTO DO ANGULO DO GIRABREQUIM *****
*
*****
*
*          INCMIN = 1
*          INCMAX = 5000
*
*****
*
***** FATOR DE EXCENTRICIDADE MINIMO *****
*
*****
*          EPMIN = 1.0E-04
*
*****
*
***** ESPESSURA DO FILME DE CLEO CRITICA *****
*
*****
*          HCRITICO = 0.2E-06
*
*****
*
***** NUMERO DE VEZES QUE RESOLVE O SISTEMA DE EQUACOES (2X2) *****
*
***** NO CALCULO DA EXCENTRICIDADE E ALFA (EM CADA PASSO) *****
*
*****
*
*          NALFAT = 5
*
*****
*
***** FATOR DE RELAXACAO PARA O CALCULO DO CAMPO DE PRESSAO *****

```

```

*
*****
*
      RF = 1.5
*
*****
*
      RETURN
      END
*
*****
*
***** FIM DA SUBROUTINE
*
*****
*
      SUBROUTINE PROBLEMA
*
*****
*
***** IDENTIFICACAO DO PROGRAMA *****
*
      ESTA SUBROUTINE LE OS DADOS DE ENTRADA EM UNIDADES
*
      COMUNENTE USADAS PELO USUARIO E AS TRANSFORMA EM
*
      UNIDADES MKS. EM SEGUIDA IMPOE AS CONDICAOES DE CON-
*
      TORNO DE PRESSAO INICIAL NULA.
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIABEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
*
*****
*
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
*
      COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1      ALFA(72001),EPSOLCN(72001),DTIME(72001),ADGT(72001) ,
2      EDOT(72001),FMT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3      ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4      PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5      h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
      COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
      COMMON/BLOCO3/HMINIMD,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAM,FCRCAC
1      ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIM01,EPMIN,
2      EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,CADOT,DELOT,DTT,CFRCE,
3      DFRDED,DFRDAD,DFTCE,DFTDED,DFTDAD,DTEMPD,SN,CARGAMAX,
4      AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5      HCRITICO,CALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,

```

6 SINA, ANGHMIN, TETAHMIN

```

*
*****
*
COMMON/BLOC04/IT, JT, KT, NT, NCONV, IORBITA, INCTETA, NALFA, NITER,
1      NCRBITA, INCMIN, INCMAX, NUMERO, NPONTOS, NPONTOS1, NITER2,
2      ICLG, NITERF, IOLD1, NITER1, NALFAT, NPASSO, IDEF
*
*****
*
INTEGER TAMNOME
*
*****
*
CHARACTER*80 NOME
*
*****
*
DATA BRANCO/' '/
*
*****
*
***** DEFINE NOME DO ARQUIVO PARA PLOTAGEM *****
*
*****
5050 CONTINUE
*
*****
*
TYPE 5000
5000 FORMAT(40(/), '$NOME DO ARQUIVO PARA PLOTAGEM : ')
*
*****
*
WRITE(15,5001)
5001 FORMAT(40(/), ' NOME DO ARQUIVO PARA PLOTAGEM : ')
*
*****
*
READ(5,5010)J,NOME
5010 FORMAT(Q,A<J>)
*
*****
*
WRITE(15,5011)NOME
5011 format(1x,a<j>)
*
*****
*
5020 CONTINUE
TYPE 5030
5030 FORMAT(/, '$DIGITE 0 - CONFIRMAR NOME ; 1 - ALTERAR NOME : ')
*
*****
*
WRITE(15,5031)
5031 FORMAT(/, ' DIGITE 0 - CONFIRMAR NOME ; 1 - ALTERAR NOME : ')
*
*****

```



```

*
*          READ(5,*)ICONF
*
*****
*
*          WRITE(15,5032)ICONF
5032      FORMAT(1x,I2)
*
*****
*
*          IF(ICONF.LT.0.OR.ICONF.GT.1)GOTO 5020
*          IF(ICONF.EQ.0)GOTO 6000
*          NOME = ' '
*          GOTO 5050
6000      CONTINUE
*
*****
*
*          TAMNOME = J
*
*****
*
***** ABERTURA DE ARQUIVO *****
*
*          OPEN(UNIT=20,FILE=NOME(1:TAMNOME),STATUS='NEW')
*
*****
*
*          WRITE(6,4000)
4000      FORMAT(30(/),' DATA DA SIMULACAO : ',/)
*          WRITE(15,4000)
*
*****
*
4015      CONTINUE
*          TYPE 4010
4010      FORMAT(/,'$DIA : ')
*          READ(5,*)ID
*          IF(ID.GT.31.OR.ID.LT.1)THEN
4095          TYPE 4095
*          FCRMAT(/,'$VALOR FORA DOS LIMITES - FAVOR REENTRAR ESSE',
1          ' DADO')
*          GOTO 4015
*          ENDIF
*
*****
*
4025      CONTINUE
*          TYPE 4020
4020      FORMAT(/,'$MES : ')
*          READ(5,*)IM
*          IF(IM.GT.12.OR.IM.LT.01)THEN
*          TYPE 4095
*          GOTO 4025
*          ENDIF
*
*****
*

```

```

4031 CONTINUE
TYPE 4030
4030 FORMAT(/,'$ANO : ')
READ(5,*)IA
IF(ia.gt.99.and.IA.LT.1900)GOTO 4031
IF(IA.GT.2000)IA=IA-2000
IF(IA.GT.99.and.ia.ge.1900) IA = IA-1900
*
*****
*
WRITE(15,*)'DIA : ',ID
WRITE(15,*)'MES : ',IM
WRITE(15,*)'ANO : ',IA
*
*****
*
WRITE(20,5071)ID,IM,IA
5071 FORMAT('DATA DA SIMULACAO : ',I2,'/',I2,'/',I2)
*
*****
*
***** DADOS DE ENTRADA DO PROBLEMA *****
*
*
5 CONTINUE
*
*****
*
***** BRANQUEIA VETOR TITULO *****
*
*
DO 159 I=1,50
TITULO(I) = BRANCO
159 CONTINUE
*
*****
*
WRITE(6,151)
151 FORMAT(/,' ENTRE COM O TITULO (MAX.50 CARACTERES)')
*
*****
*
WRITE(15,151)
*
*****
*
READ(5,152)(TITULO(I),I=1,50)
152 FORMAT(50A1)
*
*****
*
WRITE(15,1522)(TITULO(I),I=1,50)
1522 format(1x,50a1)
*
*****
*
***** GRAVA TITULO NO ARQUIVO PLOT.DAT *****
*

```

```

*****
*
*       WRITE(20,1010)(TITULO(I),I=1,50)
1010   FORMAT(//,10X,'TITULO : ',50A1,//)
*
*****
*
*       WRITE(6,22)
22     FORMAT(/,' FOLGA DIAMETRAL ( microns ) ...')
*
*****
*
*       WRITE(15,22)
*
*****
*
*       READ(5,*) DC
*
*****
*
*       WRITE(15,*)DC
*
*****
*
*       WRITE(20,5073)DC/2.0
5073   FORMAT('FOLGA RADIAL : ',F5.1)
*
*****
*
*       RC=0.5*DC*1.0E-6
*
*****
*
*       WRITE(6,30)
30     FORMAT(' ROTACOES POR MINUTO ...')
*
*****
*
*       WRITE(15,30)
*
*****
*
*       READ(5,*) RPS
*
*****
*
*       WRITE(15,*)RPS
*
*****
*
*       write(20,5072)RPS
5072   FORMAT('VELOCIDADE : ',F7.1)
*
*****
*
*       RPS=RPS/60.0
*
*****
*
*       WRITE(6,50)

```

```

50      FORMAT(' LARGURA DA BRONZINA ( mm ) ... ')
*
*****
*
      WRITE(15,50)
*
*****
*
      READ(5,*) RL
*
*****
*
      WRITE(15,*)RL
*
*****
*
      RL=RL/1000.0
*
*****
*
      WRITE(6,60)
60      FORMAT(' DIAMETRO DO EIXO ( mm ) ... ')
*
*****
*
      WRITE(15,60)
*
*****
*
      READ(5,*) DD
*
*****
*
      WRITE(15,*)DD
*
*****
*
      DD=DD/1000.0
      RR=DD/2.0
*
*****
*
*****          DADOS REFERENTE AO OLEO          *****
*
*****
*
82      CONTINUE
      WRITE(6,80)
80      FORMAT(' VISCOSIDADE DO GLEC ( mPa-s ) ..... ')
*
*****
*
      WRITE(15,80)
*
*****
*
      read(5,*) rmi
*
*****
*

```

```

WRITE(15,*)RMI
*
*****
*
RMI=rmi/1000.0
*
*****
*
pcav = 0.9
*
*****
*
***** TRANSFORMA EM ATMS.RELATIVAS *****
*
*****
*
pcav=pcav-1.0
*
*****
*
***** CONFIRMACAO DOS VALORES DOS DADOS DE ENTRADA *****
*
*****
*
WRITE(6,1999)ID,IM,IA
*
*****
*
WRITE(15,1999)ID,IM,IA
*
*****
*
WRITE(6,200) (TITULO(I),I=1,50),DC,RL*1000.0,DD*1000.0,
1 RPS*60.0,RMI*1000.0,PCAV + 1.0
*
*****
*
WRITE(15,200) (TITULO(I),I=1,50),DC,RL*1000.,DD*1000.,
1 RPS*60.,RMI*1000.0,PCAV + 1.0
*
*****
*
1999 FORMAT(10(/),13X,"DATA DA SIMULACAO : ",I2,"/",I2,"/",I2)
*
*****
*
200 FORMAT(/,13X,"os valores lidos foram ..."
1 ,/,5X,"TITULO : ",50A1,/
2 ,/, 5X,"FOLGA DIAMETRAL ( microns ) .....",E12.5
3 ,/, 5X,"LARGURA DA BRONZINA ( mm ) .....",E12.5
4 ,/, 5X,"DIAMETRO DO EIXO ( mm ) .....",E12.5
6 ,/, 5X,"ROTACAOES POR MINUTO .....",E12.5
1 ,/, 5X,"VISCOSIDADE DO CLEO ( mPa-s ) .....",E12.5
2 ,/, 5X,"PRESSAO DE CAVITACAO ( atms.abs. ) .....",E12.5
7 ,2(/),5X,"***** DIGITE ....."
8 ,2(/),5X," 0 PARA REENTRAR OS DADOS"
1 ,2(/),5X," 1 PARA CONTINUAR"
2 ,2(/),5X," 2 PARA TERMINAR" ,/,10X)
*
*****

```

```

*
*      READ(5,*) IDADOS
*
*****
*
*      WRITE(15,*)IDADOS
*
*****
*
*      IF(IDADOS.EQ.0) GOTO 5
*      IF(IDADOS.EQ.2) STOP
*
*****
*
*****      CONDICoes INICIAL E DE CONTORNO      *****
*
*
*      DO 300 K=1,2
*          DO 310 I=1,IT
*              DO 315 J=1,JT
*                  P(I,J,K)=0.
315          CONTINUE
310      CONTINUE
300      CONTINUE
*
*****
*
*****      DEFINICAO DE VARIAVEIS AUXILIARES      *****
*
*
*      NUMERO = 0
*      IORBITA = 0
*      NPONTOS = 0
*      NPONTOS1 = 0
*      CARGAMAX = 0.0
*      TETAMAX1 = PI
*      NITER2 = 1
*      NPASSO = 0
*
*****
*
*****      INCREMENTO DO ANGULO DE GIRABREQUIM      *****
*
*      INCTETA = 1000
*
*****
*
*****      DEFINE EXCENTRICIDADE MAXIMA      *****
*
*
*      EPMAX = 2.0
*
*****
*
*****      INCREMENTO DE TEMPO PARA DESLOCAMENTO EM UM CENTESIMO DE GRAU      *****
*
*****

```

```

*
      DTEMPO = 1.0/(36000.0#RPS)
*
*****
***** IERA VETORES PRESSAG E FILME *****
*****
      DO 1987 I=1,72
        PRESSAO(I) = 0.0
        FILME(I) = RC#2.0
1987    CONTINUE
*
      RETURN
      END
*
*****
***** FIM DA SUBROUTINE *****
*
      SUBROUTINE OLD(ICAR)
*
*****
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
      IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
      COMMON/BLDCC1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1      ALFA(72001),EPSOLGN(72001),DTIME(72001),ADCT(72001),
2      EDOT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3      ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIF(721),DTETA(41),
4      PRESSAC(72),FILME(72),e1fas(72001),Dtf(50),
5      h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
      COMMON/BLDCC2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*****
      COMMON/BLOC03/HMINIMO,EP,RC,RPS,RL,DO,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1      ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMO1,EPMIN,
2      EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DADOT,DEDOT,DTT,DFRDE,
3      DFRDED,DFRDED,DFTDE,DFTDED,DFTCAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4      AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELTA,DELR,
5      HCRITICO,DALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,

```

```

6          SINA, ANGHMIN, TETAHMIN
*
*****
*
COMMON/BLOCO4/IT, JT, KT, NT, NCONV, IORBITA, INCTETA, NALFA, NITER,
1          NORBITA, INCMIN, INCMAX, NUMERO, NPGNTOS, NPONTOS1, NITER2,
2          IOLD, NITERF, ICLD1, NITER1, NALFAT, NPASSO, IDEF
*
*****
*
***** ARMAZENA INDICE DO VALOR ATUAL *****
*
*****
*
NITER1=NITER
*
*****
*
***** INCREMENTA O ANGULO DO GIRABREQUIM *****
*
*****
*
niter=niter1+incteta
if(niter.gt.72001) then
  incteta=72001-niter1
  niter=72001
endif
niter2=niter2+incteta
*
*****
*
iold1=iold
if(iold1.lt.1) iold1=1
*
*****
*
***** ATUALIZA VALOR ANTERIOR *****
*
*****
*
iold=niter1
*
*****
*
***** GUARDA VALORES ANTERIORES DE DELTAEP E DALFA *****
*
*****
*
deltaep1=deltaep
dalfa1=dalfa
DMIN=1.0e-15
if(dabs(del(niter)).lt.dmin) del(niter)=dmin
if(dabs(dal(niter)).lt.dmin) dal(niter)=dmin
ftempo = 1.0
if(icar.eq.2)ftempo = 0.5
dtime(iold)=dfloet(incteta)*dtempo*ftempo
dtt=1.0/dtime(iold)
forcac=carga(niter)
al=alfa(iold)
*
*****

```



```

*****
*
*       RETURN
*       END
*
*****
*
***** FIM DE SUBROUTINE
*
*****
*
*       SUBROUTINE PERTURBA(icar)
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*       IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
*
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
*       COMMON/BLODC01/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1         ALFAC(72001),EPSOLON(72001),DTIME(72001),ADGT(72001) ,
2         EDOT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001) ,
3         ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4         PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5         h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
*       COMMON/BLODC02/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
*       COMMON/BLODC03/HMINIM0,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1         ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMA1,HMINIM01,EPMIN,
2         EPMA1,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMA,DADOT,DEDOT,DTT,DFRDE,
3         DFRDED,DFRDAD,DFTCE,DFTDED,DFTDAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4         AL,TETAMAX1,ANGPMA,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5         HCRITICO,CALMAX,DMA1,TETAPMA,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6         SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*
*       COMMON/BLODC04/IT,JT,KT,NT,NCONV,IORBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1         NGRBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2         IDLD,NITERF,IQLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*
*       goto(29,31,39,33,36),nalfa
*
*****
*

```

```

***** calculo sem perturbacao *****
*
*****
*
    dmin=0.
29  continue
    deltaep=dmin
    dalfa=dmin
    goto 35
*
*****
*
***** calculo com perturbacao em deltaep *****
*
*****
*
31  continue
    deltaep=del(niter)
    dalfa=dmin
    goto 35
*
*****
*
***** calculo com perturbacao em deltaep ponto *****
*
*****
*
39  continue
    dalfa=dmin
    deltaep=del(niter)
    goto 35
*
*****
*
***** calculo com perturbacao em dalfa *****
*
*****
*
33  continue
    dalfa=dal(niter)
    deltaep=dmin
    goto 35
*
*****
*
***** resolve sistema linear 2x2 servindo como *****
*
***** chute inicial para a solucao do sistema *****
*
***** nao linear *****
*
*****
*
36  continue
    call linear(1,n1,n2,icar)
*
*****
*
35  continue
*

```

```

*****
*
*       RETURN
*       END
*
*
***** FIM DE SUBROUTINE
*
*
*****
*
*       SUBROUTINE SOLUCAO
*
*****
*
***** IDENTIFICACAO DO PROGRAMA *****
*
*       ESTA SUBROUTINE RESOLVE O SISTEMA LINEAR RESULTANTE
*       DA DISCRETIZACAO DA EQUACAO DE REYNOLDS POR DIFERENCAS
*       FINITAS.O METODO USADO PARA A SOLUCAO E O METODO ITERATIVO
*       DE "SUCESSIVE OVER RELAXATION" (SOR).
*
*****
*
***** IDENTIFICACAO DAS VARIAVEIS *****
*
*       RR ..... RAIO DO MANCAL
*       DX(I) ..... DELTA X USADO NA DISCRETIZACAO DA EQUACAO
*                   DE REYNOLDS POR DIFERENCAS FINITAS
*       DZ(J) ..... DELTA Z (MESMO QUE ACIMA)
*       CE,CD,CI ..... COEFICIENTES DA EQUACAO DISCRETIZADA
*       CS,CC,DENOM .. COEFICIENTES DA EQUACAO DISCRETIZADA
*
*****
*
***** IDENTIFICACAO DAS MATRIZES *****
*
*       P(I,J,2) ... PRESSAO DO PONTO ((i-1),(j-1))
*                   RESULTANTE DA ITERACAO NIVEL (k+1)
*       P(I,J,1) ... PRESSAO DO PONTO ((i-1),(j-1))
*                   RESULTANTE DA ITERACAO NIVEL k
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*
*       IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
*
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
*
COMMON/BLOC01/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1      ALFA(72001),EPSOLDN(72001),DTIME(72001),ADGT(72001),
2      EDOT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001),
3      WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),

```

```

4      PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5      h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCO3/HMINIMC,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1      ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMD1,EPMIN,
2      EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DADOT,DEDOT,DTT,DFRCE,
3      DFRDED,DFRDAD,DFTDE,DFTDED,DFTDAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4      AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5      HCRITICO,DALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6      SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*
COMMON/BLOCO4/IT,JT,KT,NT,NCONV,IORBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1      NORBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2      IOLD,NITERF,IOLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*
***** TRANSFORMA AS PRESSOES K+1 EM K *****
*
*****
*
DO 5 I=1,IT
DO 5 J=1,JT
P(I,J,1)=P(I,J,2)
5      CONTINUE
*
*****
*
***** OBS : SE O COLD DO MANCAL NAO GIRA COM A CARGA (PSI) ENTAO *****
*
***** RN = RPS *****
*
*****
*
rn=rps
*
*****
*
***** INICID DA DISCRETIZACAO *****
*
*****
*
xx = 0.
DC 10 I=2,(IT-1)
xx=xx+dx(I)
teta=xx/RR
dxm=dx(I)+dx(I+1)
DC 20 J=1,(JT-1)
dzz=dz(J)
jm1=j-1
if(j.eq.1) then
jm1=2

```

```

        dzz=dz(2)
    endif
    dhdx=(h(i+1,j)-h(i-1,j))/DXM
    he3=(0.5*(h(i,j)+h(i-1,j)))**3
    hd3=(0.5*(h(i,j)+h(i+1,j)))**3
    hi3=(0.5*(H(I,J)+H(I,J+1)))**3
    HS3=(0.5*(H(I,J)+H(I,J+1)))**3
    dzm=(dzz+dz(j+1))
*
*****
*
***** DEFINE COEFICIENTES *****
*
*****
*
        CC=-(12.0*rmi)*(RR*dhdx*pi*rps+
1          rc*epsolon(iold)*adot(niter)*dsin(teta)+
2          rc*edot(niter)*dcos(teta))
*
*****
*
        denomx=0.5*dx(i)*dx(i+1)*dxm
        denomz=0.5*dzz*dz(j+1)*dzm
        denom=(hd3*dx(i)+he3*dx(i+1))/denomx+
1          (hs3*dzz+ hi3*dz(j+1))/denomz
*
*****
*
        ce=he3*dx(i+1)/denomx
*
*****
*
        cd=hd3*dx(i)/denomx
*
*****
*
        ci=hi3*dz(j+1)/denomz
*
*****
*
        cs=hs3*dzz/denomz
*
*****
*
***** APLICA METODO S.G.R *****
*
*****
*
        p(i,j,2)=(ce*p(im1,j,2)+cd*p(ip1,j,2)
1          +ci*p(i,jm1,2)+ cs*p(i,jp1,2)+cc)/denom
*
*****
*
        RF=1.5
        P(I,J,2)=P(I,J,1)+RF*(P(I,J,2)-P(I,J,1))
*
*****
*
***** CONDICAO DE CONTORNO DE REYNOLDS *****
*
*****

```

```

*****
*
*          dummy=0.
*          IF(P(I,J,2).lt.dummy) p(i,j,2)=dummy
*
*****
*
*          CONTINUE
10      continue
*
*****
*          DO 100 I=1,IT
*             DO 100 J=1,JT
*                P(I,J,2)=P(I,J,2)
100     CONTINUE
*          DO 200 I=1,IT
*             WRITE(6,210) K,(P(I,J,2),J=1,JT)
210     FORMAT(I5,5(2X,E10.3))
*          READ(5,*)
200     CONTINUE
*          RETURN
*          END
*
*****
*
***** FIM DA SUBROUTINE
*****
*
*          SUBROUTINE CONVERGE(IFLAG)
*
*****
*          IDENTIFICACAO DO PROGRAMA *****
*
*          ESTA SUBROUTINE VERIFICA A CONVERGENCIA DO METODO ITERATIVO
*          DE SOLUCAO DO SISTEMA LINEAR (SOR) .
*
*****
*          IDENTIFICACAO DAS VARIAVEIS *****
*
*          S ..... SOMA DO VALOR ABSOLUTO DOS INCREMENTOS RELATIVOS
*                   DAS PRESSOES ADIMENSIONAIS ENTRE OS NIVEIS DE
*                   ITERACAO K E (k+1)
*          DELTA ... VALOR USADO PARA A VERIFICACAO DA CONVERGENCIA
*          IFLAG ... FLAG QUE E IQUALADO A 1(HUM) QUANDO S<DELTA
*
*****
*          DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*          IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
*          ALOCACAO DE MEMORIA *****

```

```

*
*****
*
COMMON/BLOCC01/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1 ALFA(72001),EPSDLON(72001),OTIME(72001),ADDT(72001),
2 EDDT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001),
3 ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIP(721),DTETA(41),
4 PRESSAO(72),FILME(72),slfas(72001),DEF(50),
5 h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCC02/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCC03/HMINIMD,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1 ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMA1,HMINIMD1,EPMIN,
2 EPMA1,TETAMA1,PI,RR,PCAV,PMA1,DADDT,DEDDT,DTT,DFRDE,
3 DFRDED,DFRDAD,DFTCE,DFTDED,DFTDAD,DTEMPD,SN,CARGAMA1,
4 AL,TETAMA1,ANGPMA1,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5 HCRITICO,CALMA1,DMA1,TETAPMA1,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6 SINA,ANGHMIN,TETAMIN
*
*****
*
COMMON/BLOCC04/IT,JT,KT,NT,NCONV,IORBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1 NORBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2 IOLD,NITERF,IOLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*
iflag=1
DO 10 I=1,IT
DO 10 J=1,JT
S=DABS(P(I,J,2)-P(I,J,1))
IF(S.GT.delta) iflag=0
10 CONTINUE
*
*****
*
RETURN
END
*
*****
*
***** FIM DA SUBROUTINE *****
*
*****
*
SUBROUTINE CARGAH
*
*****
*
***** IDENTIFICACAO DO PROGRAMA *****
*
*
ESTA SUBROUTINE CALCULA A FORCA HIDRODINAMICA,GERADA
PELO CAMPO DE PRESSOES PROVENIENTE DA SOLUCAO DA
EQUACAO DE REYNOLDS,ASSIM COMO A FORCA CONJUGADA
(DEVIDO AO ATRITO) E A VAZAO DE CLEO.
*

```

```

*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*
      IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
*
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
*
      COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1         ALFA(72001),EPSOLON(72001),DTIME(72001),ADDT(72001),
2         EDDT(72001),FMT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3         ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4         PRESSAO(72),FILME(72),mlfas(72001),DEF(50),
5         h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
      COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
      COMMON/BLOCO3/HMINIMD,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAM,FORCAC
1         ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMD1,EPMIN,
2         EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DADDT,DEGOT,DTT,DFRDE,
3         DFRDED,DFRDAD,DFIDE,DFTDED,DFTDAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4         AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5         HCRITICO,CALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6         SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*
      COMMON/BLOCO4/IT,JT,KT,NT,NCONV,ICRBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1         NORBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2         IOLD,NITERF,IOLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*
      ft=0.
      fr=0.
      tetamax=0.
      tetamin=0.
      pmax=0.
*
*****
*
      XX=0.
      DO 10 I=1,IT
          XX=XX+DX(i)
          IM1=I-1
          IF(I.EQ.1) IM1=1
          IP1=I+1

```



```

IF(IP1.GT.IT) IP1=IT
dxm=0.5*(dx(i)+dx(ip1))
TETA=XX/RR
DO 10 J=1,JT
  jp1=j+1
  if(j.eq.jt) jp1=jt
  dzm=0.5*(dz(j)+dz(jp1))
*
***** DEFINE PRESSAC MAXIMA *****
*
PM=P(I,1,2)/101325.0
if(PM.gt.pmax)then
  pmax=PM
  tetamax=sina*(teta+alfa(niter))
endif
*
***** DEFINE OS FATORES DE AREA *****
*
fa=1.0
if(i.eq.it) fa=0.5*fa
if(j.eq.jt) fa=0.5*fa
*
***** CALCULO DA FORCA RADIAL E TANGENCIAL *****
*
fr=fr-p(i,j,2)*dcos(teta)*dzm*DXm*fa
ft=ft+p(i,j,2)*dsin(teta)*dzm*DXm*fa
*
10 CONTINUE
*
***** CALCULO DO ANGULO DE CARGA *****
*
PHI=DATAN(dabs(FT)/(dabs(FR)+SN))
if(ft.gt.0.and.fr.lt.0.) phi=(pi-phi)
if(ft.lt.0.and.fr.gt.0.) phi=2.0*pi-phi
if(ft.lt.0.and.fr.lt.0.) phi=(pi+phi)
*
***** ATUALIZACAO DOS VETORES *****
*
fi(niter) =phi
fht(niter)=ft#2.0

```

```

COMMON/BLOC04/IT, JT, KT, NT, NCONV, IORBITA, INCTETA, NALFA, NITER,
1      NORBITA, INCMIN, INCMAX, NUMERO, NPONTOS, NPONTOS1, NITER2,
2      IOLD, NITERF, IOLD1, NITER1, NALFAT, NPASSO, IDEF
*
*****
*
***** CALCULO DO INCREMENTO DA FORCA TANGENCIAL E RADIAL *****
*
*****
*
      delt=fht(niter)-fht(iold)
      delr=fhr(niter)-fhr(iold)
*
*****
*
      goto (47,41,42,43,45),nalfa
*
*****
47      continue
      fhr(iold)=fhr(niter)
      fht(iold)=fht(niter)
      goto 49
*
*****
*
***** DERIVADA DA FORCA TANGENCIAL E RADIAL EM RELACAO A DELTAEP *****
*
*****
41      continue
      if(deltaep.ne.0.) then
         goto 51
      else
         dftde=0.
         dfrde=0.
         goto 49
      endif
*
*****
*
51      continue
      dummy=deltaep+sn
      if(deltaep.lt.0.) dummy=deltaep-sn
      dftde=delt/dummy
      dfrde=delr/dummy
      goto 49
*
*****
*
**** DERIVADA DA FORCA TANGENCIAL E RADIAL EM RELACAO A DELTAEP PONTO ****
*
*****
42      continue
      if(dedot.ne.0.) then
         goto 152
      else
         dftded=0.
         dfrded=0.

```

```

fhr(niter)=fr*2.0
*
*****
*
***** CALCULO DA FORCA HIDRODINAMICA *****
*
*****
*
FORCAH=2.0*((FR**2+FT**2)**0.5)
*
*****
*
RETURN
END
*
*****
*
***** FIM DA SUBROUTINE *****
*
*****
*
SUBROUTINE DERIVA(SK)
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*
IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
*
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
*
COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1 ALFA(72001),EPSOLCN(72001),DTIME(72001),ADDT(72001) ,
2 EDDT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3 ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4 PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5 h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULC(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCO3/HMINIMO,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FCRCAC
1 ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMO1,EPMIN,
2 EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DAOCT,GEDOT,DTT,DFRDE,
3 DFRDED,DFRDAD,DFTCE,DFTDED,DFTDAD,DTEMPD,SN,CARGAMAX,
4 AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELTA,DELR,
5 HCRITICO,DALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6 SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*

```

```

          goto 49
        endif
152      continue
        dummy=dadot+sn
        if(dadot.lt.0.) dummy=dadot-sn
        dftdad=delt/dummy
        dfrdad=delr/dummy
        goto 49
*
*****
*
***** DERIVADA DA FORCA TANGENCIAL E RADIAL EM RELACAO A DALFA PONTO *****
*
*****
*
43      continue
        if(dadot.ne.0.) then
          goto 53
        else
          dftdad=0.
          dfrdad=0.
          goto 49
        endif
*
*****
*
53      continue
        dummy=dadot+sn
        if(dadot.lt.0.) dummy=dadot-sn
        dftdad=delt/dummy
        dfrdad=delr/dummy
        goto 49
*
*****
*
***** CARREGA VETORES COM OS VALORES ENCONTRADOS DE *****
*
***** DELTAEP, DALFA, DELTAEP PONTO, DALFA PONTO *****
*
*****
*
45      continue
        del(niter)=deltaep
        dal(niter)=dalfa
        edot(niter)=deltaep*dtt
        adot(niter)=dalfa*dtt
49      continue
*
*****
*
      RETURN
      END
*
*****
*
***** FIM DE SUBROUTINE *****
*
*****
*
      SUBROUTINE TESTCCNV(ijklmn)

```

```

*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*
      IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
*
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
*
      COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1          ALFA(72001),EPSOLON(72001),DTIME(72001),ADOT(72001) ,
2          EDDOT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3          ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4          PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5          h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
      COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
      COMMON/BLOCO3/HMINIMO,EP,RC,RPS,RL,DO,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1          ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMO1,EPMIN,
2          EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,OADOT,GEDOT,DTT,DFRDE,
3          DFRDED,DFRDAD,DFTDE,DFTDED,DFTGAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4          AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5          HCRITICO,DALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6          SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*
      COMMON/BLOCO4/IT,JT,KT,NT,NCONV,IORBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1          NGRBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2          IGLD,NITERF,IOLD1,NITER1,NALFAT,NPASSG,IDEF
*
*****
*
      IJKLMN=0
      al = alfa(niter)
*
*****
*
***** CALCULO DA FORCA TANGENCIAL E RADIAL APLICADA *****
*
*****
*
      ft = wy(niter)*dsin(al)+wx(niter)*dcos(al)
      fr = wy(niter)*dcos(al)-wx(niter)*dsin(al)
*
*****
*
***** CALCULA DIFERENCA RELATIVA *****
*
*****

```



```

*
*****
*
      RETURN
      END
*
*****
*
***** FIM DE SUBROUTINE
*
*
      SUBROUTINE DPASSO
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*
      IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
*
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
*
      COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1      ALFA(72001),EPSOLCN(72001),DTIME(72001),ADDT(72001),
2      EDOT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3      ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4      PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5      h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
      COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
      COMMON/BLOCO3/HMINIMO,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAM,FORCAC
1      ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMO1,EPMIN,
2      EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DADDT,DEDOT,OTT,DFRDE,
3      DFRQED,DFRQAD,DFTDE,DFTDED,DFTCAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4      AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELTA,DELTA,
5      HCRITICO,DALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6      SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*
      COMMON/BLOCO4/IT,JT,KT,NT,NCONV,ICRBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1      NORBITA,INCMIN,INCMA,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2      IOLD,NITERF,IOLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*
***** APRESENTA MENSAGEM DE NAO CONVERGENCIA *****
*
*****

```

```

*
*      WRITE(6,55)
*
*
*****
*
*      WRITE(15,55)
*
*****
55      format(/,21('*'),"      N A O   C O N V E R G I U   ",
1          4X,22('*'))
*
*****
*      npasso = 0
*
*****
***** VERIFICA SE A SOLUCAO DIVERGIU TOTALMENTE *****
*
*****
*      numero=numero+1
*      if(numero.gt.20) stop
*
*****
***** DIMINUI O TAMANHO DO PASSO *****
*
*****
*      niter=niter-incteta
*      niter2=niter2-incteta
*      incteta=incteta/2
*      nconv=1
*      if(incteta.lt.incmin) incteta=incmin
*
*****
*
*      RETURN
*      END
*
*****
***** FIM DE SUBRGUTINE
*****
*
*      SUBROUTINE APASSO(dalconv,dalconv,inconv)
*
*****
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*      IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****

```



```

***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
*
COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1 ALFA(72001),EPSOLON(72001),OTIME(72001),ADOT(72001),
2 EDOT(72001),FMT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3 ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4 PRESSAD(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5 h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCO3/HMINIMO,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1 ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMO1,EPMIN,
2 EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DADOT,DEDOT,DTT,DFRDE,
3 DFRDED,DFRDAD,DFTCE,DFTDED,DFTDAD,DTEMPD,SN,CARGAMAX,
4 AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5 HCRITICO,DALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6 SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*
COMMON/BLOCO4/IT,JT,KT,NT,NCONV,IORBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1 NORBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2 IOLO,NITERF,IOLO1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*
***** AUMENTA O TAMANHO DO PASSO *****
*
*****
*
numero = 0
*
*****
*
inconv = incteta
dalconv = deltaep
dalconv = dalfa
*
*****
*
***** CALCULA AS RAZOES DE CONVERGENCIA *****
*
*****
*
rda = dabs(dalfa)/dalmax
rde = dabs(deltaep)/dmax
*
*****
*
***** ESCOLHE A MAIOR DAS RAZOES *****
*
*****
*

```



```

rmaior = rda
if(rde.gt.rmaior)rmaior = rde
*
*****
*
***** DEPENDENDO DO VALOR DA RAZAO AUMENTA OU DIMINUI O PASSO *****
*
*****
*
IF(RMAIOR.LT.0.6) INCTETA=INCTETA*5/4
IF(RMAIOR.GT.0.4) incteta=INCTETA*4/5
if(incteta.lt.5) incteta=5
*
*****
*
nconv=0
if(incteta.gt.incmax)incteta = incmax
*
*****
*
RETURN
END
*
*****
*
***** FIM DE SUBROUTINE
*
*****
*
SUBROUTINE GRAFICO
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*
IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
*
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
*
COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1 ALFA(72001),EPSCLCN(72001),DIME(72001),AGGT(72001),
2 EDDT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3 ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4 PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5 h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCO3/HMINIMC,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FCRCAH,FCRCAC
1 ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAI1,HMINIMC1,EPMIN,

```

```

*****
*
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
*
COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1 ALFA(72001),EPSOLON(72001),DTIME(72001),ADDT(72001),
2 EDOT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3 ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4 PRESSAD(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5 h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCO3/HMINIMD,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1 ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMD1,EPMIN,
2 EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DADDT,DEDOT,DTT,DFRDE,
3 DFRDED,DFRDAD,DFTDE,DFTDED,DFTDAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4 AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5 HCRITICO,DALMAX,OMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6 SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*
COMMON/BLOCO4/IT,JT,KT,NT,NCONV,IORBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1 NDRBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2 IOLD,NITERF,IOLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*
DIMENSION LETRA(25,80),XX(112),YY(35),Z(10000),W(10000),
1 VI(10000),XLABEL(10)
*
*****
*
CHARACTER*1 CHARC
DATA A,B,C/'*',','+ '/'
*
*****
*
DO 5 I=1,npontos
VI(I)=1.0
5 CONTINUE
*
*****
*
***** VERIFICA XMAX,XMIN,YMAX,YMIN *****
*
*****
*
XMIN=-1.0
YMIN=-1.0
XMAX=+1.0
YMAX=1.0
*
*****

```

```

*****
*
  DO 6 I=1,NPONTOS
    IF(X(I).LT.XMIN) XMIN=X(I)
    IF(X(I).GT.XMAX) XMAX=X(I)
    IF(Y(I).GT.YMAX) YMAX=Y(I)
    IF(Y(I).LT.YMIN) YMIN=Y(I)
6    CONTINUE
*
*****
*
***** DEFINE OS PONTOS DA CIRCUNFERENCIA DE RAO UNITARIO *****
*
  DO 18 I=1,361
    B=2.0*3.14159265*OFLOAT(I-1)/361.0
    Z(I)=DCOS(B)
    W(I)=DSIN(B)
18  CONTINUE
*
*****
*
***** TAMANHO DO INCREMENTO EM X E Y *****
*
  NX=61
  NY=21
*
*****
*
  RNX=FLOAT(NX)
  RNY=FLOAT(NY)
*
*****
*
  DX=(XMAX-XMIN)/(RNX-1.0)
  DY=(YMAX-YMIN)/(RNY-1.0)
*
*****
*
***** BRANQUEIA A MATRIZ LETRA *****
*
  DO 20 I=1,NY
    DO 20 J=1,NX
*
*****
*
      LETRA(I,J)=' '
*
*****
*
***** CONSTRUE OS EIXOS *****
*
*****
*
      IF(I.EQ.NY) LETRA(I,J)='- '

```

```

          IF(J.EQ.1) LETRA(I,J)='I'
*
*****
*
20      CONTINUE
*
*****
*
***** INICIA A CONSTRUCAO DO GRAFICO *****
*
*****
*
      DO 49 IJK=1,2
*
*****
*
      DO 50 I=NY,1,-1
          YYY=YMAX-FLOAT(I-1)*DY
          YY(I)=YYY
*
*****
*
      DO 60 J=1,NX
          XXX=XMIN+FLOAT(J-1)*DX
          XX(J)=XXX
*
*****
*
***** LOCALIZA OS PONTOS DA ORBITA *****
*
*****
*
      DO 100 K=1,NPONTOS
          D1=ABS(YYY-Y(K))-0.5*DY
          D2=ABS(XXX-X(K))-0.5*DX
          IF(D1.LT.0.AND.D2.LT.0.) THEN
              LETRA(I,J)='o'
              XX(J)=X(K)
              YY(I)=Y(K)
          ENDIF
100      continue
*
*****
*
***** LOCALIZA OS PONTOS DA CIRCUNFERENCIA *****
*
*****
*
      do 101 k=1,361
          f1=dabs(yyy-z(k))-0.5*dy
          f2=dabs(xxx-w(k))-0.5*dxx
          IF(F1.LT.0.AND.F2.LT.0.) THEN
              LETRA(I,J)='.'
              XX(J)=W(K)
              YY(I)=Z(K)
          ENDIF
101      continue
*
*****
*

```

```

60          CONTINUE
50          CONTINUE
49          CONTINUE
*
*****
*
***** DIVIDE O EIXO X EM 4 INTERVALO PARA COLOCACAO DE VALORES *****
*
*****
*
      DD 25 J=1,61,15
          LETRA(NY,J)='+'
25          CONTINUE
*
*****
*
          WRITE(6,180)
*
*****
*
          WRITE(15,180)
*
*****
*
180         FORMAT(20(/))
*
*****
*
***** DIVIDE O INTERVALO Y EM 5 INTERVALOS PARA COLOCACAO DE VALORES *****
*
***** E IMPRIME MATRIZ LETRA *****
*
*****
*
      DO 200 J=1,NY
          IF(I.EQ.21.OR.I.EQ.16.OR.I.EQ.11.
1          OR.I.EQ.6.OR.I.EQ.1) THEN
              LETRA(I,1)='+'
              WRITE(6,240) YY(I), (LETRA(I,J),J=1,61)
              WRITE(15,240)YY(I), (LETRA(I,J),J=1,61)
          ELSE
              WRITE(6,250) (LETRA(I,J),J=1,61)
              WRITE(15,250)(LETRA(I,J),J=1,61)
          ENDIF
*
*****
*
240         FORMAT(F7.1,1X,61A1)
250         FORMAT(8X,61A1)
*
*****
*
200         CONTINUE
*
*****
*
          DUMMY=0.
          DO 202 I=1,5
              XLABEL(I)=XMIN+DFLOAT(I-1)*(XMAX-XMIN)/4.0
202         CONTINUE

```

```

*
*****
*
      WRITE(6,300) (XLABEL(I),I=1,5)
*
*****
*
      WRITE(15,300)(XLABEL(I),I=1,5)
*
*****
*
300      FORMAT(2X,5(3X,F5.2,7X))
*
*****
*
      IF(INDIC.EQ.2)THEN
*
*****
*
          WRITE(6,112)
*
*****
*
          WRITE(15,112)
*
*****
*
112      FORMAT(/,25X,"PRESS LINE FEED")
          READ(5,*)
*
*****
*
          IF(LNDIC.EQ.0)THEN
              CHARC = "/"
              WRITE(20,1987)CHARC
1987      FORMAT(A1,/,T5,"PRES.MAXIMA BRONZ",T30,"H.MIN.BRONZ")
              DO 1989 I=1,72
                  WRITE(20,1988)PRESSAO(I),FILME(I)*1.0E+06
1988      FORMAT(T6,E15.7,T30,E15.7)
1989      CONTINUE
          ENDIF
      ENDIF
*
*****
*
      RETURN
      END
*
*****
*
***** FIM DA SUBROUTINE *****
*
*****
*
      SUBROUTINE LINEAR(IFLAG,n1,n2,icar)
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*

```



```

*****
*
*      IMPLICIT REAL*8(A-h,O-Z)
*
*****
*
*****      ALOCACAO DE MEMORIA      *****
*
*****
*
COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1      ALFA(72001),EPSQLON(72001),DIME(72001),ADGT(72001),
2      EDOT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3      ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4      PRESSAO(72),FILME(72),s1fas(72001),DEF(50),
5      h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCO3/HMINIMO,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1      ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PHAX1,HMINIMO1,EPMIN,
2      ,EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PHAX,DADOT,DEDOT,DTT,DFRDE,
3      DFRDED,DFRDAD,CFTDE,DFTDED,DFTDAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4      AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DEL,DELR,
5      HCRITICO,DALMAX,DHAX,TETAPHAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6      SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*
COMMON/BLOCO4/IT,JT,KT,NT,NCONV,IDRBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1      NORBITA,INCMIN,INCHAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2      IOLD,NITERF,ICLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*
      if(iflag.eq.1) then
          n1=niter-incteta
          n2=niter
          dt=1.0/dtime(iold)
      else
          n1=niter
          n2=niter+incteta
          ftempo = 1.0
          if(icar.eq.2)ftempo = 0.5
          dt=1.0/(dfloat(incteta)*dtempo*ftempo)
      endif
      al = alfa(n1)
*
*****
*
*****      CARREGA O SISTEMA 2X2      *****
*
*****      DIVIDE OS ELEMENTOS DO SISTEMA PELO ELEMENTO DA DIAGONAL      *****
*
*****
*
*****

```

```

*      write(6,*) dfrde,dfrded,dfrda
*      write(6,*) dftde,dftded,dftda
*      read(5,*)
*      x11=-dfrde-dfrded*dtt
*      d1=x11+sn
*      if(x11.lt.0.) d1=x11-sn
*
*****
*
*      x12=-dfrdad*dtt+wy(n2)*dsin(a1)+wx(n2)*dcos(a1)
*      X12=X12/d1
*
*****
*
*      x21=-dftde-dftded*dtt
*
*****
*
*      x22=-dftdad*dtt+wx(n2)*dsin(a1)-wy(n2)*dcos(a1)
*      d2=x22+sn
*      if(x22.lt.0.) d2=x22-sn
*
*****
*
*      X21=X21/d2
*
*****
*
*      y1=+wy(n2)*dcos(a1)-wx(n2)*dsin(a1)+fhr(n1)
1      -(dfrded)*edot(n1)-dfrdad*adot(n1)
*      Y1=Y1/d1
*
*****
*
*      y2=+wy(n2)*dsin(a1)+wx(n2)*dcos(a1)+fht(n1)
1      -(dftded)*edot(n1)-dftdad*adot(n1)
*      Y2=Y2/d2
*
*****
*
*      X11 = 1.0
*
*****
*
*      X22 = 1.0
*
*****
*
***** CALCULA O DETERMINANTE DA MATRIZ E RESOLVE O SISTEMA LINEAR *****
*
*****
*
*      det=x11*x22-x21*x12
*      det1=y1*x22-y2*x12
*      det2=x11*y2-x21*y1
*
*****
*
*      dummy=det+sn
*      if(det.lt.0.) dummy=det-sn

```

```

*
*****
*
      x1=det1/dummy
      x2=det2/dummy
*
*****
*
***** DEFINE VALDR DE DELTAEP E DALFA ENCONTRADO *****
*
*****
*
      deltaep=x1
      dalfa=x2
*
*****
*
37      CONTINUE
*
*****
*
      RETURN
      END
*
*****
*
***** FIM DE SUBROUTINE *****
*
*****
*
      SUBROUTINE NDLINE(n1,n2)
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIABEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*
      IMPLICIT REAL*8(A-h,O-Z)
*
*****
*
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
*
      COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1         ALFA(72001),EPSCLGN(72001),DTIME(72001),ADOT(72001),
2         EDOT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3         ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4         PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DzF(50),
5         h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
      COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
      COMMON/BLOCO3/HMINIMO,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC

```

```

1      ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMO1,EPMIN,
2      EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DADOT,DEDOT,DTT,DFRDE,
3      DFRDED,DFRDAD,CFTDE,DFTDED,DFTDAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4      AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5      HCRITICO,DALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFY,OFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6      SINA,ANGHMIN,TETAHMIN

```

```

*
*****
*

```

```

COMMON/BLOC04/IT,JT,KT,NT,NCONV,IORBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1      NORBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2      IOLD,NITERF,IOLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF

```

```

*
*****
*

```

```

***** UTILIZA OS VALORES ENCONTRADOS NA SOLUCAO DO SISTEMA *****

```

```

***** LINEAR COMO CHUTE DE ENTRADA PARA O SISTEMA NAO LINEAR *****

```

```

*
*****
*

```

```

      da=dalfa
      de=deltaep

```

```

*
*****
*

```

```

***** INICIO DO METODO ITERATIVO *****

```

```

*
*****
*

```

```

5      do 1001 k=1,50

```

```

*
*****
*

```

```

***** CARREGAMENTO DOS ELEMENTOS DO SISTEMA *****

```

```

*
*****
*

```

```

      a11=dfrde+dfrded*dtt
      a12=-wy(n2)*dsin(al+da)-wx(n2)*dcos(al+da)+dfrdad*dtt
      a21=dftde+dftded*dtt
      a22=+wy(n2)*dcos(al+da)-wx(n2)*dsin(al+da)+dftdad*dtt
      b1=-(+wy(n2)*dcos(al+da)-wx(n2)*dsin(al+da)+fhr(n1)
1      +(dfrde+dfrded*dtt)*de+dfrdad*dtt*da
2      -((dfrded)*edot(n1)+dfrdad*adot(n1)))
      b2=-(+wy(n2)*dsin(al+da)+wx(n2)*dcos(al+da)+fht(n1)
1      +(dftde+dftded*dtt)*de+dftdad*dtt*da
2      -((dftded)*edot(n1)+dftdad*adot(n1)))

```

```

*
*****
*

```

```

***** CALCULA DETERMINANTE E RESOLVE SISTEMA *****

```

```

*
*****
*

```

```

      det=a11*a22-a12*a21
      dummy=det+sn
      if(det.lt.0.) dummy=det-sn
      d1=(b1*a22-b2*a12)/dummy
      d2=(a11*b2-a21*b1)/dummy

```

```

*
*****
*
***** CALCULA FATOR DE RELAXACAO *****
*
*
*      fator=0.1+0.05*dfloat(k-1)
*      if(fator.gt.1.0) fator=1.0
*
*
***** INCREMENTA DELTAEP E DALFA *****
*
*      de=de+fator*d1
*      da=da+fator*d2
*
*
***** VERIFICA A CONVERGENCIA *****
*
*      DMIN=1.0E-15
*      if(dabs(d1).lt.DMIN.and.dabs(d2).lt.DMIN) then
*        goto 1002
*      endif
1001  continue
*
*      write(6,12)
*
*      WRITE(15,12)
*
*      format(5(/),10x,'***** newton raphson *****',5(/))
12    continue
*
***** REDEFINE DELTAEP E DALFA COM OS VALORES ENCONTRADGS *****
*
*      dalfa=da
*      deltaep=de
*
*
37    continue
*
*
*      return

```

```

end
*
*****
*
***** FIM DE SUBROUTINE
*
*
subroutine limite(ijklmn)
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
*
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
COMMON/BLOC01/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1 ALFA(72001),EPSOLON(72001),DTIME(72001),ADOT(72001),
2 EDOT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3 ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4 PRESSAO(72),FILME(72),#lfas(72001),DEF(50),
5 h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
COMMON/BLOC02/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
COMMON/BLOC03/HMINIMD,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1 ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIM01,EPMIN,
2 EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DADOT,DEDOT,DTT,DFRDE,
3 DFRDED,DFRDAD,DFTCE,DFTDED,DFTODD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4 AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5 HCRITICO,DALMAX,OMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6 SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*
COMMON/BLOC04/IT,JT,KT,NT,NCONV,IORBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1 NORBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2 IOLD,NITERF,IOLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*
***** VERIFICA LIMITACAO DO VALOR DE EPSOLON *****
*
*****
*
dmin=1.0e-15
epmax1 = 0.999
ijklmn=0

```



```

endif
*   if(dabs(dalfa).lt.dmin) then
*       dalfa=dmin
*       iijklmn=1
*   endif
*
*****
*
***** DEFINE VALOR DE ALFA E ALFA PONTO *****
*
*
*   alfa(niter)=alfa(iold)+dalfa
*   alfas(niter)=alfa(niter)*sina
*   adot(niter)=dalfa*dtt+adot(iold)
*   if(nalfa.eq.5) adot(niter)=dalfa*dtt
*
*****
*
***** DEFINE VALOR DE DELTA ALFA PONTO *****
*
*   dadot=adot(niter)-adot(iold)
*
*****
11   continue
*
*
*   return
*   end
*
*****
*
***** FIM DE SUBROUTINE *****
*
*
SUBROUTINE CHUTE(delconv,dalconv,inconv,icar)
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*
IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
*
***** ALGOCAD DE MEMORIA *****
*
*****
COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1   ALFA(72001),EPSOLCN(72001),DTIME(72001),ADGT(72001),
2   EDDT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3   ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4   PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DcF(50),
5   h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)

```



```

*
*****
*
COMMON/BLOC02/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
COMMON/BLOC03/HMINIMO,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1      ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMO1,EPMIN,
2      EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DADOT,DEDOT,DTT,DFRDE,
3      DFRDED,DFROAD,DFTCE,DFTDEC,DFTDAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4      AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5      HCRITICO,DALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6      SINA,ANGHMIN,TETAMIN
*
*****
*
COMMON/BLOC04/IT,JT,KT,NT,NCONV,IORBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1      NORBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2      IOLD,NITERF,IOLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*
AL = ALFA(NITER)
FR = WY(NITER)*DCOS(AL) - WX(NITER)*DSIN(AL)
FT = WY(NITER)*DSIN(AL) + WX(NITER)*DCOS(AL)
*
*****
*
call sinal(fr,fhr(niter),ft,fht(niter),sinalr,sinalt)
*
*****
*
NN = NITER + INCTETA
*
*****
*
***** TAMANHO DA PERTURBACAO NO INICIO DO CALCULO *****
*
*****
*
dal(NN)=1.0E-8*sinalr
dal(NN)=1.0E-8*sinalt
*
*****
*
if(niter.gt.1000) then
*
*****
*
***** TAMANHO DO INCREMENTO DURANTE O PROCESSO *****
*
*****
*
*****
*
***** CASO TENHA OCCORRIDO CONVERGENCIA *****
*
*****

```

```

*
*          CALL LINEAR(2,n1,n2,icar)
*          call noline(n1,n2)
*          del(NN)=1.0E-8*sinalr
*          dz1(NN)=1.0E-8*sinalt
*
*****
*
*          ELSE
*
*****
*
***** CASO NAO TENHA OCORRIDO CONVERGENCIA *****
*
*****
*
*          DEL(NN) = 1.0E-8*sinalr
*          DAL(NN) = 1.0E-8*sinalt
*          ENDIF
*          endif
*
*****
*
*          RETURN
*          END
*
*****
*
***** FIM DE SUBROUTINE *****
*
*****
*
*          SUBROUTINE PRINT(IJKLMN,SK,ICAR)
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*
*          IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
*
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
*
*          COMMON/BLOC01/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1             ALFA(72001),EPSOLON(72001),DTIME(72001),ADDT(72001),
2             EDDT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3             ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4             PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5             h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
*          COMMON/BLOC02/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****

```

```

*
COMMON/BLOC03/HMINIMO,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1      ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMO1,EPHIN,
2      EPHAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DADOT,DEGOT,DTT,DFRDE,
3      DFRDED,DFRDAD,DFTOE,DFTDED,DFTDAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4      AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5      HCRITICO,DALMAX,OMAX,TETAFMAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6      SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*
COMMON/BLOC04/IT,JT,KT,NT,NCONV,IORBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1      NORBITA,INCMIN,INCMAX,KUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2      IOLD,NITERF,IOLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*
CHARACTER#1 CH
CHARACTER#30 LLL
*
*****
*
***** IMPRESSAO PARCIAL DOS RESULTADOS *****
*
*****
*
      al=alfa(niter)
*
*****
*
      fa=dsqrt(wx(niter)**2+wy(niter)**2)
*
*****
*
      fh=dsqrt(fht(niter)**2+fhr(niter)**2)
*
*****
*
      fator=180.0/pi
      dummp=fator*(al-fi(niter))
      dummya=fator*(alfas(niter)+pi)
*
*****
*
89      continue
*
*****
*
      if(dummp.gt.360.0) dummp=dummp-360.0
      if(dummya.gt.360.0) dummya=dummya-360.0
      if(dummya.lt.0.0) dummya=dummya+360.0
      if(dummp.lt.0.0) dummp=dummp+360.0
      if(dabs(dummya).gt.360.0.or.dabs(dummp).gt.360.0) goto 89
*
*****
*
      FTEMPC = 1.0
      IF(ICAR.EQ.2)FTEMPO=0.5
*
*****

```

```

*
***** I M P R E S S O E S *****
*
*
*       write(6,1009)(titulo(jk),jk=1,50)
*
*
*       write(15,1009)(titulo(jk),jk=1,50)
*
*
*       LLL='HORARIO'
*       IF(SINA.EQ.1.0) LLL='ANTI-HORARIO'
*       WRITE(6,1111) LLL,IORBITA,NPONTOS1
*       WRITE(15,1111) LLL,IORBITA,NPONTOS1
*
*
*       WRITE(6,34) dfloat(niter-1)/100.0*FTEMPO,
*       1  ftempo*dfloat(incteta)/100.0,
*       1  ep,dummya,deltaep,SINA*dalfa*fator,fa,(psi(niter)*fator),
*       2  fh,dumyp
*
*
*       WRITE(15,34)DFLOAT(NITER-1)/100.0*FTEMPO,
*       1  ftempo*DFLOAT(INCTETA)/100.0,
*       1  EP,DUMMYA,DELTAEP,SINA*DALFA*FATOR,FA,(PSI(NITER)*FATOR),
*       2  FH,DUMYP
*
*
*       write(6,36) pmax,hminim*1.0e+6
*
*
*       WRITE(15,36)PMAX,HMINIM*1.0E+6
*
*
*       if(ep.ge.epmax.and.ijklmn.eq.0) then
*
*
*       write(6,876)
*
*
*       WRITE(15,876)
*
*
*       stop
*       endif
*
***** SE FOR A ULTIMA ORBITA GERA ARQUIVO PLOT.CAT *****

```

```

*
*****
*
      IF(IJKLMN.EQ.0.AND.IORBITA.EQ.(NORBITA+1))THEN
*
*****
*
      CH = '*'
      WRITE(20,1030)CH,FTEMPD*DFLOAT(NITER-1)/100.0,EP,DUMMYA,
1      PMAX,HMINIMO*1.0E+6
*
*****
*
      ENDIF
*
*****
*
      FNIT = 100.0*SK/(ftempo*DFLOAT(INCTETA))
      WRITE(6,40)FNIT
      WRITE(15,40)FNIT
*
*****
*
*****   F O R M A T   *****
*
*****
*
1009   format(20(/),1x,"TITULO : ",50a1)
*
*****
*
1111   format(/,1x,"SENTIDO ",A30,15X,"ORBITA NUMERO ",
1      12,5X,"(",I2," )")
*
*****
*
34     format(/,24('*'),"          C A L C U L A N D O          ",
1      23('*'),1(/),
2      ' ang. girabrequim ... ',e12.5,15X,"passo ..... ',e12.5,/ ,
3      ' fator excentricidade ',e12.5,15X,"alfa ..... ',e12.5,/ ,
4      ' delta epsolon ..... ',e12.5,15X,"delta alfa ..... ',e12.5,/ ,
5      ' carga aplicada ..... ',e12.5,15X,"psi aplicado ..... ',e12.5,/ ,
6      ' carga calculada ..... ',e12.5,15X,"psi calculado .... ',e12.5)
*
*****
*
36     format(
6      ' pressao maxima ..... ',e12.5,15X,"espessura minima . ',e12.5)
*
*****
*
40     FORMAT(1X,"***** # de iteracoes por grau de girabrequim
1      ... ',F7.1," *****")
*
*****
*
876   FORMAT(3(/),10X,
1      'EXCENTRICIDADE M U I T O A L T A ..... ABORTO!',
2      3(/))
*
*****

```

```

*****
*
1030   FORMAT(A1,1X,E12.5,T19,E12.5,T35,E12.5,T50,E12.5,T66,E12.5)
*
*****
*
      RETURN
      END
*
*****
*
***** FIM DE SUBROUTINE
*
*****
*
      SUBROUTINE RESUMO(icar)
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS COM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*
      IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
*
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
*
      COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1      ALFA(72001),EPSOLON(72001),DTIME(72001),ADGT(72001),
2      EDDT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3      ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4      PRESSAO(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5      h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
      COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
      COMMON/BLOCO3/HMINIMO,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1      ,RHS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMO1,EPMIN,
2      EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DADDT,DEDOT,DTT,DFRDE,
3      DFRDED,DFRDAD,DFTOE,DFTDED,DFTDAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4      AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5      HCRITICO,DALMAX,DHAX,TETAPHAX,DFT,DFFT,DFR,DFFR,TETAMIN,
6      SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*
      COMMON/BLOCO4/IT,JT,KT,NT,NCONV,IDRBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1      NORBITA,INCMIN,INCHAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2      ICLD,NITERF,ICLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*

```

```

Character#30 l11
*
*****
*
***** QUADRO RESUMO DOS RESULTADOS *****
*
*****
*
      ftempo = 1.0
      if(icar.eq.2)ftempo = 0.5
*
*****
*
      angb = angpmax*180.0/pi
      angh = anghmin*180.0/pi
*
*****
*
310   continue
      if(angb.gt.360.0)angb = angb-360.0
      if(angb.lt.0.0)angb=angb +360.0
      if(angb.gt.360.0.or.angb.lt.0.0)goto 310
*
*****
*
3000  continue
      if(angh.gt.360.0)angh = angh-360.0
      if(angh.lt.0.0)angh=angh+360.0
      if(angh.gt.360.0.or.angh.lt.0.0)goto 3000
*
*****
*
      l11 = 'Horario'
      if(sina.eq.1.0)l11 = 'Anti-Horario'
*
*****
*
      write(6,137) (titulo(i),i=1,50),l11,pmax1,((tetapmax-1)/
1          100.0)*ftempo,angb,hminimol*1.0e+6,((tetahmin
1          -1)/100.0)*ftempo,angh
*
*****
*
      write(15,137)(titulo(i),i=1,50),l11,pmax1,((tetapmax-1)/
1          100.0)*ftempo,angb,hminimol*1.0e+6,((tetahmin
1          -1)/100.0)*ftempo,angh
*
*****
*
137   format(20(/),25x,'RESUMO DDS RESULTADOS',///,
1     10x,'titulo : ',50a1,/,
2     10x,'sentido ',a30,/,
1     10x,'pressao maxima ( atms. ) .....',e12.5,/,
1     10x,'angulo do girabrequim (graus) .....',e12.5,/,
1     10x,'angulo na bronzina (graus) .....',e12.5,/,
2     10x,'espessura minima do filme ( microns ) ....',e12.5,/,
3     10x,'angulo do girabrequim (graus) .....',e12.5,/,
4     10x,'angulo na bronzina (graus) .....',e12.5,/)
*
*****

```

```

*
*       write(6,112)
*
*
*****
*
*       write(15,112)
*
*****
*
112      format(25x,"press line feed")
*
*****
*
*       read(5,*)
*
*****
*
      RETURN
      END
*
*****
*
***** FIM DE SUBROUTINE
*
*****
*
      SUBROUTINE SINAL(FAR,FHDR,FAT,FHDT,SINALR,SINALT)
*
*****
*
***** DECLARACAO DE VARIAVEIS CGM PRECISAO DUPLA *****
*
*****
*
      IMPLICIT REAL*8(A-h,o-z)
*
*****
*
***** DEFINE O SINAL A SER UTILIZADO NA PERTUBACAO DE DALFA *****
*
*****
*
      DIFR = FAR - FHDR
*
*****
*
      IF(DIFR.GT.0.0)THEN
          SINALR = +1.0
      ELSE
          SINALR = -1.0
      ENDIF
*
*****
*
      DIFT = FAT - FHDT
*
*****
*

```



```

IF(DIFT.GT.0.0)THEN
  SINALT = -1.0
ELSE
  SINALT = +1.0
ENDIF

```

```

*
*****
*

```

```

RETURN
END

```

```

*
*****
*

```

```

***** FIM DA SUBROUTINE

```

```

*
*****
*

```

```

SUBROUTINE TELA

```

```

*
*****
*

```

```

***** ESSA SUBROUTINE MONTA A TELA INICIAL DE APRESENTACAO *****

```

```

*
*****
*

```

```

WRITE(6,6)

```

```

*
*****
*

```

```

WRITE(15,6)

```

```

*
*****
*

```

```

6 FORMAT(20(/))

```

```

*
*****
*

```

```

WRITE(6,10)

```

```

*
*****
*

```

```

WRITE(15,10)

```

```

*
*****
*

```

```

10

```

```

FORMAT(/,

```

```

1 12X, "*****"
1  ,/
2 12X, "*"
2  ,/
3 12X, "*" **          *****          *****          **** */**          *****
3  ,/
4 12X, "*" **          ** **          **          **          **          **
4  ,/
5 12X, "*" **          ** **          **          **          **          **
5  ,/
6 12X, "*" **          ** **          **          **          **          **
6  ,/
7 12X, "*" **          ** **          **          **          **          *****
7  ,/

```

```

8 12X,"* ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** ** **   ** **   ** *
8 ,/,
9 12X,"* ** ** ** ** ** **   ** **   ** *
9 ,/,
1 12X,"* ** ** **   ** **   ** *
1 ,/,
2 12X,"* ***** ***** ***** ***** ***** *
2 ,/,
3 12X,"* ** ** **   ** **   ** *
3 ,/,
4 12X,"*****
4 ,/,
5 12X,"          press line feed ',//)

*
*****
*
*   read(5,*)
*
*****
*
*   WRITE(6,6)
*
*****
*
*   WRITE(15,6)
*
*****
*
*   WRITE(6,20)
*
*****
*
*   WRITE(15,20)
*
*****
*
20  FORMAT(/,
1 12X,"*****',//,
3 12X,"*          ',//,
4 12X,"*          O programa "SAE" simula a orbita do   ',//,
5 12x,"*          eixo e as propriedades hidrodinamicas de - ',//,
6 12x,"*          um mancal alinhado, perfeitamente cilindri ',//,
7 12x,"*          co, sujeito a um carregamento dinamico.   ',//,
8 12x,"*          ',//,
9 12x,"*          Os principais dados de entrada sao :      ',//,
1 12x,"*          ',//,
2 12x,"*          1) titulo (maximo 50 caracteres)           ',//,
4 12x,"*          2) folga diametral (microns)                ',//,
5 12x,"*          3) rotacao do eixo (rpm)                       ',//,
5 12x,"*          4) sentido da rotacao                          ',//,
6 12x,"*          5) largura da bronzina (mm)                    ',//,
7 12x,"*          6) diametro do eixo (mm)                       ',//,
8 12x,"*          7) viscosidade do oleo (mPa-s)                ',//,
9 12x,"*          8) cargas aplicadas (N)                        ',//,
1 12x,"*          9) angulo de aplicacao das cargas,            ',//,
2 12x,"*          medido a partir do eixo y (rd).                 ',//,
5 12x,"*          ',//,
7 12x,"*****',//,
8 12x,"          press line feed' )
*

```



```

*
***** ALOCACAO DE MEMORIA *****
*
*****
*
COMMON/BLOCO1/P(50,50,2),DAL(72001),CARGA(72001),PSI(72001),
1 ALFA(72001),EPSGLON(72001),DTIME(72001),AGOT(72001),
2 EDDT(72001),FHT(72001),FHR(72001),FI(72001),WX(72001)
3 ,WY(72001),DEL(72001),CARGAM(721),PSIM(721),DTETA(41),
4 PRESSAD(72),FILME(72),alfas(72001),DEF(50),
5 h(50,50),dh(50,50),dx(50),dz(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCO2/X(10000),Y(10000),TITULO(50)
*
*****
*
COMMON/BLOCO3/HMINIMO,EP,RC,RPS,RL,DD,RMI,DELTA,FORCAH,FORCAC
1 ,RNS,PHI,FCONJ,DELTAEP,DALFA,PMAX1,HMINIMO1,EPMIN,
2 EPMAX,TETAMAX,PI,RR,PCAV,PMAX,DADOT,DECOT,DTT,DFRDE,
3 DFRDED,DFRDAD,DFTDE,DFTDED,DFTOAD,DTEMPO,SN,CARGAMAX,
4 AL,TETAMAX1,ANGPMAX,DALFA1,DELTAEP1,RF,DELT,DELR,
5 HCRITICO,CALMAX,DMAX,TETAPMAX,DFT,DFFT,DFR,OFFR,TETAMIN,
6 SINA,ANGHMIN,TETAHMIN
*
*****
*
COMMON/BLOCO4/IT,JT,KT,NT,NCONV,IDRBITA,INCTETA,NALFA,NITER,
1 NORBITA,INCMIN,INCMAX,NUMERO,NPONTOS,NPONTOS1,NITER2,
2 IOLD,NITERF,IOLD1,NITER1,NALFAT,NPASSO,IDEF
*
*****
*
***** DEFINE INCREMENTO DE ANGULO E LINHA DE CENTRO *****
*
*****
*
SALTO = 5.0*PI/180.0
TBRONZ=ALFA(NITER)
*
*****
*
***** VERIFICA SE ANGULO E MAIOR QUE 360 OU MENDR DE ZERO GRAUS *****
*
*****
*
10 CONTINUE
IF(TBRONZ.GE.(2.0*PI))TBRONZ=TBRONZ - 2.0*PI
IF(TBRONZ.LT.0.0)TBRONZ=TBRONZ+2.0*PI
IF(TBRONZ.LT.0.0.OR.TBRONZ.GE.(2.0*PI))GOTO 10
TALFA = TBRONZ
*
*****
*
ANGANT = TBRONZ - DTETA(1)
ANGINIC = ANGANT
*
*****
*

```

```

1099 CONTINUE
IF(ANGINIC.GT.(2.0*PI))ANGINIC = ANGINIC-2.0*PI
IF(ANGINIC.LT.0.0)ANGINIC = ANGINIC + 2.0*PI
IF(ANGINIC.LT.0.0.OR.ANGINIC.GT.(2.0*PI))GOTO 1099
*
*****
*
TBRONZ = ANGANT
PRESSADA = P(IT,1,2)
RESTO = DMOD(ANGANT,SALTO)
ANGULO = ANGANT + (SALTO-RESTO)
IF(ANGANT.LT.0)ANGULO = ANGANT-RESTO
*
*****
*
DO 20 I=1,IT
*
*****
*
TBRONZ = TBRONZ + DTETA(I)
DIFF = 0
IF(I.EQ.IT)THEN
DIFF = ANGINIC - TBRONZ
ENDIF
ANGPOST= TBRONZ + DIFF
*
*****
*
***** PEGA A PRESSAO DO PONTO CENTRAL EM Z *****
*
*****
*
JM=(JT+1)/2
PRESSAOP = P(I,1,2)/101325.0
*
*****
*
100 CONTINUE
IF(ANGULO.GE.ANGPOST)THEN
ANGANT = ANGPOST
PRESSADA = PRESSAOP
GOTO 20
ENDIF
*
*****
*
***** INTERPOLA LINEARMENTE *****
*
*****
*
A = PRESSAOP - PRESSADA
B = ANGPOST - ANGANT
DINCLIN = A/B
D = ANGULO - ANGANT
PRESS = PRESSADA + D*DINCLIN
*
*****
*
Angaux=angulo - alfa(niter)
fil = rc*(1.0+ep*dcos(angaux))

```

```

*
*****
*
***** DEFINE ANGULO PARA SER UTILIZADO NO CALCULO DO INDICE *****
*
*****
*
      ANGI= ANGULO*sina
21  CONTINUE
      IF(ANGI.GT.(2.0*PI))ANGI=ANGI-2.0*PI
      IF(ANGI.LE.0.0)ANGI=ANGI+2.0*PI
      IF(ANGI.LE.0.DR.ANGI.GT.(2.0*PI))GOTO 21
*
*****
*
      INDICE = IDINT((ANGI+1.0E-06)/SALTO)
      IF(INDICE.EQ.0)INDICE=72
      IF(PRESS.GT.PRESSAO(INDICE))PRESSAO(INDICE)=PRESS
      IF(FIL.LT.FILME(INDICE))FILME(INDICE)=FIL
*
*****
*
***** INCREMENTA ANGULO *****
*
*****
*
      ANGULO = ANGULO + SALTO
      GOTO 100
*
*****
*
20  CONTINUE
*
*****
*
      RETURN
      END
*
*****
*
***** FIM DE SUBRGUTINE *****
*
*****
*

```

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. Pinkus, O.; Sternlicht, B. (1965). "Theory of Hydrodynamic Lubrication", McGraw-Hill.
02. Dowson, D.; Higginson, G. R. (1977). "Elasto-Hydrodynamic Lubrication", Pergamon Press, Oxford.
03. Slaymaker, R. R. (1955). "Bearing Lubrication Analysis", John Wiley and Sons, New York.
04. Hollander, M.; Bryda, K. A. (1983). "Interpretation of Engine Bearing Performance by Journal Orbit Analysis", S.A.E., International Congress and Exposition, Detroit, USA.
05. Lloyd, T. (1966). "Dynamically Loaded Journal Bearings", Ph.D. Thesis, The University of Nottingham, Nottingham, Inglaterra.
06. Currie, I. G. (1974). "Fundamental Mechanics of Fluids", McGraw-Hill, Toronto.
07. Malvern, L. E. (1969). "Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium", Prentice Hall.
08. Szeri, A. Z. (1980). "Tribology: Friction, Lubrication, and Wear", Hemisphere Publishing Company, New York.
09. Mitchell A. R.; Griffiths, D. F. (1980). "The Finite Difference Method in Partial Differential Equations", John Wiley and Sons.
10. Carnhan, B.; Luther, H. A.; Wilkes, J. O. (1969). "Applied Numerical Methods", John Wiley and Sons, New York.
11. Forsythe, G.; Moler, C. B. (1967). "Computer Solution of Linear Algebraic Systems", Prentice-Hall Series Automatic Computation, Englewood Cliffs, N. J.
12. Varga, R. S. (1962). "Matrix Iterative Analysis", Prentice-Hall Series in Automatic Computation, Englewood Cliffs, N. J.

13. Faddeev, D. K.; Faddeeva, V. N. (1963). "Computational Methods of Linear Algebra", W. H. Freeman and Company, San Francisco.
14. Nakamura, S. (1977). "Computational Methods in Engineering and Science with Applications to Fluid Dynamics and Nuclear Systems", John Wiley and Sons, New York.
15. Slaymaker, R. R.; Ross, J. M. (1969). "Journal Center Orbits in Piston Engine Bearings", S.A.E., International Automotive Engineering Congress, Detroit, USA.
16. Sasak S.; et al. (1987). "Effects of Geometric Defects in Journals on Bearing Performance", S.A.E., International Congress and Exposition, Detroit, USA.
17. Duddley, B. (1985). "Lecture Notes on Tribology", The University of Nottingham, Nottingham, Inglaterra.
18. Spiegel M. R. (1963). "Theory and Problems of Advanced Calculus", McGraw-Hill, Great Britain.
19. Taylor C. M. (1985). Comunicação Pessoal, Leeds University, Leeds, Inglaterra.
20. Gervé A.; Katzenmeier G.; Kollmann K. (1970). "Relationship between Oil Film Thickness and Wear of Journal Bearings", Combined National Farm, Constuction and Industrial Machinery and Powerplant Meeting, Milwaukee, USA.
21. Duarte Jr. D. (1985). "The Matemactical Modelling and Simulation of Sliding Bearings under Static and Dynamic Load", Relatório Técnico no. 216.425, Metal Leve S.A., São Paulo.
22. Duarte Jr. D.; Zottin W. (1986). "Teoria de Mancais Hidrodinâmicos I: A Equação de Reynolds", Relatório Técnico no. 216.454, Metal Leve S.A., São Paulo.



23. Duarte Jr. D.; Zottin W. (1986). "MANCAL: Um Programa para Cálculo das Propriedades Hidrodinâmicas de Bronzinas sob Carregamento Estático", Relatório Técnico no. 216.456, Metal Leve S.A., São Paulo.
24. Duarte Jr. D.; Zottin W. (1987). "LOCUS: Um Programa para Cálculo das Propriedades Hidrodinâmicas de Bronzinas sob Carregamento Dinâmico", Relatório Técnico, Metal Leve S.A., São Paulo.
25. Duarte Jr. D.; Zottin W.; Urbani Filho O. (1987). "Modelagem Matemática e Simulação de Mancais Hidrodinâmicos", IV SIMEA, Simpósio de Engenharia Automotiva, São Paulo.
26. Duarte Jr. D. (1987). "Modelagem Matemática e Simulação de Mancais Hidrodinâmicos num Contexto Industrial", X Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, Gramado, R.S.
27. Duarte Jr. D.; Tu C. C. C.; Kaufmann M. (1988), ( a ser publicado), "Sliding Surface Profiling for the Prevention of Fatigue in Big-End Con-Rod Bearings", S.A.E., International Congress and Exposition, Detroit, USA.
28. Leites J. M. M.; Duarte Jr. D.; Cullen J. A. T. (1987). "Análise de Tensões no Cubo de um Pistão para Motor de Combustão Interna, Considerando-se a Formação de um Filme Hidrodinâmico de Oleo", IV SIMEA, Simpósio de Engenharia Automotiva, São Paulo.
29. Salamani J. C.; Kaufman M. (1987). "Análise Orbital de Mancais Hidrodinâmicos Aplicada ao Projeto de Mancais de Motores Alternativos de Combustão Interna", IV SIMEA, Simpósio de Engenharia Automotiva, São Paulo.
30. Duarte Jr. D.; Zottin W. (1987). "Estudo Comparativo entre a Teoria de Ockvirk e a Teoria Bi-Dimensional de Reynolds", Relatório Interno, Metal Leve S.A., São Paulo.
31. Yahraus W. A. (1987). "Improving Sleeve Bearing Fatigue Life - A New Design Concept", S.A.E., Highway Vehicles Meeting and Exposition, Milwaukee, USA.

32. Gero L. R.; Ettles C. M. (1985). "An Evaluation of Finite Difference and Finite Element Methods for the Solution of the Reynolds Equation", ASLE Transactions, Nevada, USA.
33. Marhus D.; Kuniyoshi S. (1977). "Cargas em Bronzinas, Lubrificação Estática e Lubrificação Dinâmica", Relatório Técnico número 216119, Metal Leve S.A., São Paulo.
34. Duarte Jr. D., Zottin W., Leites J. M. M. (1988). "Aplicação do Método dos Elementos Finitos para a Solução da Equação de Reynolds", Relatório Interno, Metal Leve S.A., São Paulo.
35. Cullen J. A. T. ; Marhus D.; Matsuo E. (1983). "Tendências no Desenvolvimento de Pistões para Motores de Combustão Interna", Sétimo Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM), Uberlândia, M.G..
36. Trafaillê J. (1982). "Pistons for Passenger Cars and the Derived Commercial Diesel Engines", Third Symposium, Associated Engineering, England.
37. Booker J. F. ; Huebner K. H. (1972). "Application of Finite Element Methods to Lubrication: An Engineering Approach", Journal of Lubrication Technology.
38. Stafford A. C.; et al. (1983). "The Solution of Lubrication and Coupled Analyses Using the Finite Element Method", SAE, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, USA.
39. Buckholz R. H.; Hwang B. (1986). "The Accuracy of Short Bearing Theory for Newtonian Lubricants", Journal of Tribology, Vol. 108, Atlanta, Georgia, USA.
40. Jakeman R. W. (1984). "A numerical Analysis Method Based on Flow Continuity for Hydrodynamic Journal Bearings", Tribology International.
41. Cullen J. A. T. (1982). "Reprodução da Geração de Trincas no Cubo de um Pistão Automotivo em Laboratório", Relatório Interno, Metal Leve S.A., São Paulo.

42. LaBouff G. A.; Booker J. F. (1985). " Dynamically Loaded Journal Bearings: A finite Element Treatment for Rigid and Elastic Surfaces", Journal of Tribology, Vol. 107, San Diego, California , USA.
43. Goenka P. K. (1984). "Dynamic Loaded Journal Bearings: Finite Element Method Analysis", Journal of Tribology, ASME/ASLE Joint Lubrication Conference, Hartford, Conn., USA.
44. Pinkus o. (1986). "The Reynolds Centennial: A Brief History of the Theory of Hydrodynamic Lubrication", ASME/ASLE Joint Lubrication Conference, Pittsburgh, Pensilvania, USA.