UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

MÉTODO DE SIMULAÇÃO DE MANCAIS HIDRODINÂMICOS

DE SAPATAS PIVOTADAS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGANHARIA

DAVI PESSOA FERRAZ

SETEMBRO - 1980

MÉTODO DE SIMULAÇÃO DE MANCAIS HIDRODINÂMICOS
DE SAPATAS PIVOTADAS

DAVI PESSOA FERRAZ

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO -MESTRE EM ENGANHARIA - ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA - E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.

Prof. Nelson Back. Ph. D.
Orientador

Prof. Arno Blass, Ph. D.
Coordenador

APRESENTADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS PROFESSORES

Prof. Nelson Back, Ph. D.

Prof. Rogério Tadeu da Silva Ferreira, Ph. D.

Prof. Longuinho da Costa Machado Leal, M.Sc.

SUMÁRIO

O objetivo deste trabalho é a elaboração de um método computacional para o projeto de mancais hidrodinâmicos, tomando em consideração um fator muito importante no seu dimensionamento - a influência da temperatura na viscosidade do óleo.

O método utilizado na solução das equações diferenciais envolvidas no processo é o de diferenças finitas. Como resultado é apresentado um fluxograma completo, a listagem e um pequeno manual de utilização do programa obtido, que pode ser empregado na otimização de mancais radiais e axiais de sapatas pivotadas.

ABSTRACT

The purpose of this work is to develop a computational method for hydrodynamac bearing design, taking into account a very important factor. The effect of the temperature on the oil's viscosity.

The finite difference method is used for the solution of the differential equations involved in this process. As a result the complete computational flow-chart, the listing of the program and a guide for program's users as shown and can be used for pivoted pads' optimization of journal and thrust bearing.

APLICAÇÃO DE COMPUTADOR DIGITAL NO

PROJETO DE MANCAIS HIDRODINÂMICOS

SUMÁRIO

NOMENCLATURA

B	Comprimento da sapata.
C	Folga do mancal radial.
C_v	Calor específico do lubrificante.
e	Excentricidade do mancal.
F	Força.
h	Espessura da película do lubrificante.
i	Índice z/r .
j	Índice x/θ .
K	Contador de iterações.
k	Número de ordem de iterações.
L	Largura da sapata.
M	Tamanho da malha na direção x/θ .
N	Tamanho da malha na direção z/r , rotação
P	Pressão – perda de potência.
Q	Escoamento do fluido.
Q_1	Escoamento na entrada da película do óleo.
Q_2	Escoamento na saída tangencial
Q_3, Q_4	Escoamento nas saídas transversais.
q_x, q_z, q_r, q_θ	Escoamento unitário nas direções x, z, r, θ.
R, r	Raio.
T	Temperatura.
U, V, W	Velocidades.
x, y, z	Coordenadas.
$(\bar{x}, \bar{z}), (\bar{r}, \bar{\theta})$	Coordenadas do centro de pressões.
θ	Ângulo.
	Peso específico.
ε	Limite de iterações.
$\Delta\tau$	Diferença de temperaturas.
μ	Viscosidade absoluta do óleo.
ρ	Massa específica do óleo.
ω	Velocidade angular.
θ_t	Ângulo subtendido pela sapata de mancal axial.

CAPÍTULO I

1 . 1 - OBJETIVO

A análise e projeto de mancais hidrodinâmicos exige a consideração de dois fatores muito importantes para o desempenho dos mesmos, que são: a largura e a variação da viscosidade. Estes dois fatores, em uma análise primária da equação usada para o cálculo das pressões, são simplificados para a obtenção da solução desta equação. A largura é considerada infinitamente longa ou infinitamente curta e a viscosidade é tomada constante dentro da área do mancal. A inclusão destes dois fatores na equação de pressões complica-a de tal forma que sua solução só pode ser obtida por métodos numéricos. Muitos autores [2], [3],[5], [6], [7], têm obtido resultados por este processo e publicado em forma de gráficos e tabelas, embora nem sempre usando os dois fatores em questão. O objetivo deste trabalho é a elaboração de um programa computacional que considere as dimensões finitas do mancal e a variação da viscosidade no cálculo de mancais hidrodinâmicos radiais e axiais de sapatas pivotadas. Neste programa haverá uma pequena diferença no agrupamento das variáveis de projeto, com relação ao dimensionamento usando os gráficos mencionados anteriormente. No dimensionamento por gráficos as variáveis sob controle do projetista são:

1 - viscosidade
2 - carga sobre o mancal
3 - velocidade

4 - dimensões do mancal

As variáveis obtidas indiretamente, pela variação de uma ou mais variáveis deste grupo, denominadas fatores de projeto, são as seguintes :

5 - perda de potência
6 - elevação de temperatura
7 - vazão de lubrificante
8 - altura mínima da película de óleo

No método proposto, a altura mínima do filme de lubrificante será considerada como uma variável de controle, enquanto que a carga sobre o mancal passará a ser um fator de projeto , ficando então a seguinte situação :

Variáveis de Controle

1 - viscosidade
2 - altura mínima do filme de óleo
3 - velocidade de rotação do mancal
4 - dimensões do mancal

Fatores de Projeto

5 - perda de potência
6 - elevação de temperatura
7 - vazão de lubrificante

8 - força sobre o mancal

As variáveis do segundo grupo são denominadas fatores de projeto porque, embora sejam valores a determinar, é preciso que se estabeleça para elas um campo de variação definido pelas condições do projeto (material do mancal, lubrificante a ser usado e capacidade de carga mínima desejada).

1 . 2 - SIMPLIFICAÇÕES

Osborne Reynolds, tentando explicar a geração de pressões entre duas superfícies separadas por uma película de óleo e em movimento relativo de deslizamento, observadas por Beauchamp Tower, deduziu uma equação que ficou conhecida como equação de Reynolds (1.1). | 4 |

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(h^3 \frac{\partial P}{\partial X}\right) + \frac{\partial}{\partial Z}\left(h^3 \frac{\partial P}{\partial Z}\right) = 6\mu (U_1 - U_2)\frac{\partial H}{\partial X} + 12\mu \left(U_1 \frac{\partial H}{\partial X} + V_1\right) \quad (1.1)$$

Para obter esta equação, Reynolds baseou-se em uma série de hipóteses simplificativas que para a época, 1886, e para grande parte dos casos atuais, foram consideradas satisfatórias. Estas hipóteses são:

a) Os raios de curvatura dos componentes do mancal são muito grandes em comparação com a espessura do filme;

b) O lubrificante é newtoniano ;

c) As forças de inércia e gravitacionais são pequenas quando comparadas com as forças de pressão e de viscosidade ;

d) O óleo adere perfeitamente nas superfícies do mancal ;

e) Na película de lubrificante são considerados gradientes de velocidade apenas nas direções x e z (fig.1) ;

f) A viscosidade é constante ;

g) A densidade é constante ;

h) O fluido é incompressível ;

i) Regime estacionário .

A partir da década de 1940, devido à crescente severidade das condições de uso e precisão exigidas, muitas das hipóteses foram eliminadas. Em 1961, Dowson [4] deduziu uma equação, por ele chamada de " Equação de Reynolds Generalizada " baseado em um mínimo de simplificações (hipóteses a, b, c, d, e) obtendo, então, a seguinte equação :

$$\frac{\partial}{\partial X}\left[(F_2-G_1)\frac{\partial P}{\partial Z}\right]+\frac{\partial}{\partial Z}\left[(F_2+G_1)\frac{\partial P}{\partial Z}\right]= h\left[\frac{\partial(\rho U)2}{\partial X}+\frac{\partial(\rho W)2}{\partial Z}\right]$$

$$-\frac{\partial}{\partial X}\left[\frac{(U_2-U_1)(F_3-G_2)}{F_o}+U_1G_3\right]-\frac{\partial}{\partial Z}\left[\frac{(W_2-W_1)(F_3-G_2)}{F_o}+W_1G_3\right]$$

$$+\int_o^h\frac{\partial\rho}{\partial T}\,dy+(\rho V)_2-(\rho V)_1$$

onde

$$F_o = \int_o^h \frac{\partial y}{\partial \mu}$$

$$F_1 = \int_o^h \frac{y\ dy}{\mu} = \bar{y}\ F_o$$

$$F_2 = \int_o^h \frac{\rho y}{\mu} (y - \bar{y})\ dy$$

$$F_3 = \int_o^h \frac{\rho\ y}{\mu}\ dy$$

$$G_1 = \int_o^h \left[y \frac{\partial \rho}{\partial y} \left(\int_o^y \frac{y}{\mu}\ dy - \bar{y} \int_o^y \frac{\rho y}{\partial \mu} \right) \right] dy$$

$$G_2 = \int_o^h \left[y \frac{\partial \rho}{\partial y} \int_o^y \frac{\partial y}{\partial \mu} \right] dy$$

$$G_3 = \int_o^h y \frac{\partial \rho}{\partial y}\ dy$$

O sistema de coordenadas utilizado está apresentado na Figura 1, na folha seguinte:

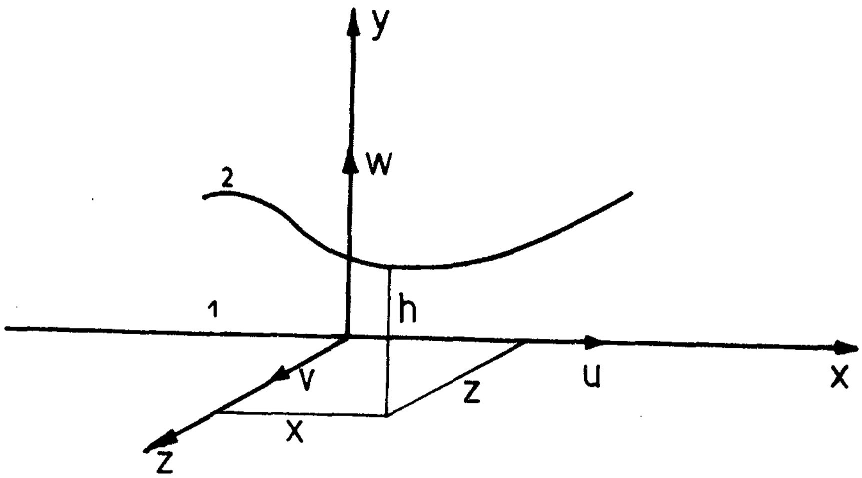


Figura 1 - Sistema de Coordenadas

Neste sistema de coordenadas, o plano Y = 0 (1) , representa a parte fixa do mancal, enquanto o plano 2, representado por uma linha, simboliza a parte movel. A expressão (1.2) admite a variação da viscosidade e densidade do fluido ao longo e através da espessura do filme (Funções F's e G's). Tanto a equação (1.1), tal como foi deduzida por Reynolds, como a equação generalizada (1.2), não admitem soluções exatas. A maneira de obtenção de resultados, a partir destas equações, varia desde considerar um mancal semi-infinito, ou seja, desprezar o fluxo em uma determinada direção, até o uso de elementos finitos. O método que será utilizado neste trabalho será o de diferenças finitas. Este método tomou grande impulso com o advento dos computadores de alta velocidade, e é usado por quase todos os pesquisadores em lubrificação, seja como ferramenta de trabalho, ou como base de comparação para outros métodos alternativos.

O cálculo das características de projeto dos mancais hidrodinâmicos de sapatas pivotadas será realizado baseado na equação (1.2), com as seguintes simplificações adicionais:

f) $\frac{\partial \rho}{\partial y} = 0$ A densidade não varia através da espessura do filme. Esta hipótese anula as funções G_1, G_2 e G_3.

g) $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ Regime estacionário

h) $\frac{\partial \rho}{\partial Z} = \frac{\partial \rho}{\partial X} = 0$ Fluido incompressível

i) $\frac{\partial \mu}{\partial y} = 0$ A viscosidade é constante através da espessura do filme, variando apenas nas direções x e z.

Com estas hipóteses simplificativas a equação (1.2) torna-se :

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{h^3}{12\mu}\frac{\partial P}{\partial X}\right) + \frac{\partial}{\partial Z}\left(\frac{h^3}{12\mu}\frac{\partial P}{\partial Z}\right) = h\left(\frac{\partial V2}{\partial X} + \frac{\partial W2}{\partial Z}\right) +$$

$$- \frac{\partial}{\partial X}\left[\frac{h\,(U2 - U1)}{2}\right] - \frac{\partial}{\partial Z}\left[\frac{h\,(W_2 - W_1)}{2}\right] - V_2 - V_1 \qquad (\ 1.3\ )$$

Para mancais hidrodinâmicos o triedro 1 da Figura 1 representará as sapatas e será considerado fixo. Isto anula as velocidades U_1, V_1 e W_1. Para a parte móvel do mancal só será admitido o deslocamento na direção x, o que implica em :

$$V_2 = W_2 = 0.$$

$W_2=0$, significa que não haverá aproximação do eixo e da sapata , ou seja, o mancal deve ser solicitado com carga estática. A aplicação de

$$V_1 = W_1 = V_2 = U_1 = W_2 = 0$$

na equação (1.3) resultará em

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial P}{\partial X}\right) + \frac{\partial}{\partial Z}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial P}{\partial Z}\right) = 6\, U_2 \frac{\partial h}{\partial X} \qquad (\ 1.4\ )$$

As variações da viscosidade nas direções x e z, usadas em (1.4), serão obtidas - indiretamente - pelo cálculo da distribuição de temperaturas através da equação da energia (1.5).

$$6U_2 \rho c_v h\left[\left(1 - \frac{h^2}{6\mu U_2}\frac{\partial P}{\partial X}\right)\frac{\partial T}{\partial X} - \frac{h^2}{6\,\mu U_2}\frac{\partial P}{\partial Z}\cdot\frac{\partial T}{\partial Z}\right] = \frac{12\mu U_2^2}{h}\left\{1 + \frac{h^4}{12\mu^2 U_2^2}\left[\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)\right]\right\} \qquad (\ 1.5\ )$$

Na derivação da equação da energia (Ver apêndice 2) o fluido foi considerado adiabático, ou seja, todo o trabalho realizado sobre o lubrificante será nele armazenado em forma de energia interna, elevando sua temperatura. Para fluidos incompressíveis, como será considerado no nosso caso, a elevação da temperatura provocará uma diminuição da viscosidade e, consequentemente, influirá na capacidade de carga e na espessura mínima do filme. A espessura mínima do filme e o valor máximo da temperatura são os dois parâmetros comumente empregados como critérios de falhas dos mancais. A temperatura máxima permitida no filme depende das características do lubrificante, como a temperatura em que o óleo começa a perder suas propriedades e do limite de temperatura permitido pelo material da sapata. Além disso, o gradiente térmico provoca a deformação da sapata, mudando a filme.

Já a espessura mínima permitida, depende de fatores tais como acabamento superficial, grau de desalinhamento e tamanho das partículas sólidas não eliminadas pelo sistema de filtros.

As considerações energéticas dos mancais hidrodinâmicos assumem, assim, considerável importância para o dimensionamento do sistema de resfriamento, evitando o encadeamento mais comum nas falhas dos mancais: aumento da temperatura devido ao cisalhamento do óleo; diminuição da viscosidade; redução da altura mínima do filme e, consequentemente, falha.

CAPÍTULO II

FORMULAÇÃO TEÓRICA

2 . 1 - INTRODUÇÃO

Os mancais hidrodinâmicos podem ser divididos em duas categorias básicas que são: mancais radiais e mancais axiais. Da categoria de mancais radiais, serão estudados apenas os de sapatas pivotadas, enquanto dos mancais axiais serão vistos casos de sapatas pivotadas e fixas. As configurações dos dois casos, Fig.2, nos obriga a escolher, no caso de mancais axiais, um sistema de coordenadas polares enquanto que, no caso de mancais radiais-considerando que a folga é muito pequena em relação ao raio de curvatura. Pode-se considerar as sapatas planas e utilizar um sistema de coordenadas cartesianas.

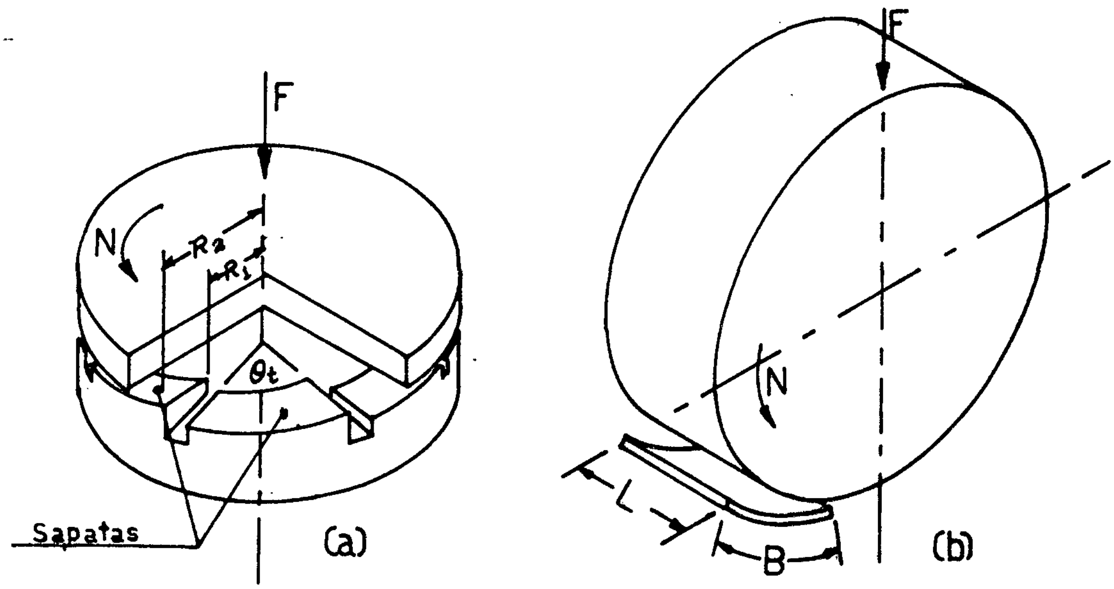


Figura 2. a) mancal axial ; b) mancal radial.

Como será desenvolvido um programa para atender aos dois casos, serão pesquisados alguns fatores que compatibilize os dois sistemas de forma a permitir resolvê-los em um único programa.

2 . 2 - EQUAÇÕES DO SISTEMA

Para mancais radiais, com a utilização de coordenadas retangulares, a equação de Reynolds utilizada será a expressão (1.4) do capítulo 1, transcrita a seguir.

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial P}{\partial X}\right) + \frac{\partial P}{\partial Z}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial P}{\partial Z}\right) = 6U\frac{\partial h}{\partial X} \qquad (\ 2.1\ )$$

Os valores da viscosidade serão calculados, simultaneamente com a equação (2.1), a partir dos valores da temperatura obtidos com a equação da energia (apêndice 2).

$$6U\rho C_v h\left[\left(1-\frac{h^2}{6\mu U}\frac{\partial P}{\partial X}\right)\frac{\partial T}{\partial X} - \frac{h^2}{6\mu U}\frac{\partial P}{\partial Z}\frac{\partial T}{\partial Z}\right] = \frac{12\mu U^2}{h}\left\{1 + \right.$$

$$\left. + \frac{h^4}{12\mu^2 U^2}\left[\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)^2\right]\right\} \qquad (\ 2.2\ )$$

Para a solução numérica destas equações é conveniente a sua redução a uma forma adimensional para se eliminar o máximo possível de coeficientes. O conjunto de fatores mais adequados é o seguinte :

$$\bar{x} = x/B \ ; \ \bar{Z} = Z/B \ ; \ \bar{h} = h/B$$

$$\bar{\mu} = \mu/\mu_1 \ ; \ \bar{\rho} = \rho/\rho_1 \ ; \ \bar{P} = PB/6\mu_1 U$$

$$\bar{T} = T\rho_1 C_v B/\mu_1 U \qquad (2.3)$$

O indice 1 assinala valores de propriedade do óleo na aresta de entrada da sapata (Fig.3).

Para o caso de lubrificação a óleo, que é o objetivo do trabalho, pode-se considerar o fluido incompressível e, consequentemente :

$$\bar{\rho} = \rho/\rho_1 = 1$$

A aplicação dos fatores (2.3) na equação da energia resultará em

$$\bar{h}\left(1 - \frac{\bar{h}^2}{\bar{\mu}}\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{X}}\right) - \frac{\bar{h}^3}{\bar{\mu}}\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{Z}}\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{Z}} = 2\frac{\bar{\mu}}{\bar{h}}\left\{1 + \frac{3\bar{h}^4}{\bar{\mu}^2}\left[\left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{X}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{Z}}\right)^2\right]\right\} \qquad (2.4)$$

Enquanto que a equação de Reynolds, com a aplicação dos mesmos fatores, ficará na forma

$$\frac{\partial}{\partial \bar{X}}\left(\frac{\bar{h}^3}{\bar{\mu}}\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}}\right) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}}\left(\frac{\bar{h}^3}{\bar{\mu}}\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{z}}\right) = \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{x}} \qquad (2.5)$$

Para a aplicação em mancais axiais, onde é necessário o uso de coordenadas polares, Fig.3, a equação de Reynolds assume a forma

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{rh^3}{\mu}\cdot\frac{\partial P}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\frac{h^3}{\mu r}\frac{\partial P}{\partial \theta}\right)= 6W_r\frac{\partial h}{\partial \theta} \qquad (2.6)$$

Enquanto que a equação da energia passa a ser escrita da seguinte maneira:

$$(2\Pi N r^2)\frac{\mu}{h} + \frac{h^3}{\mu}\left[\left(\frac{\partial P}{r\partial \theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial r}\right)^2\right] +$$

$$- C_v\rho\left[\left(\Pi N r - \frac{h^3\partial P}{12\mu r\partial\theta}\right)\frac{\partial T}{r\partial\theta} - \frac{h^3}{12\mu}\frac{\partial P}{\partial r}\frac{\partial T}{\partial r}\right]= 0 \qquad (2.7)$$

Neste caso, os fatores adimensionais mais adequados são:

$$\bar{r} = r/R_2 \;;\; \bar{h} = h/_1 \;;\; \bar{\theta} = \theta \;;\; \bar{\mu} = \mu/\mu_1$$

$$\bar{P} = P/(12\Pi\ N'\mu_1) \text{ com } N' = (R_2/h_1)^2 N$$

$$\bar{T} = KT \quad \text{onde } K = \rho C_v/(12\Pi N'\mu_1) \qquad (2.8)$$

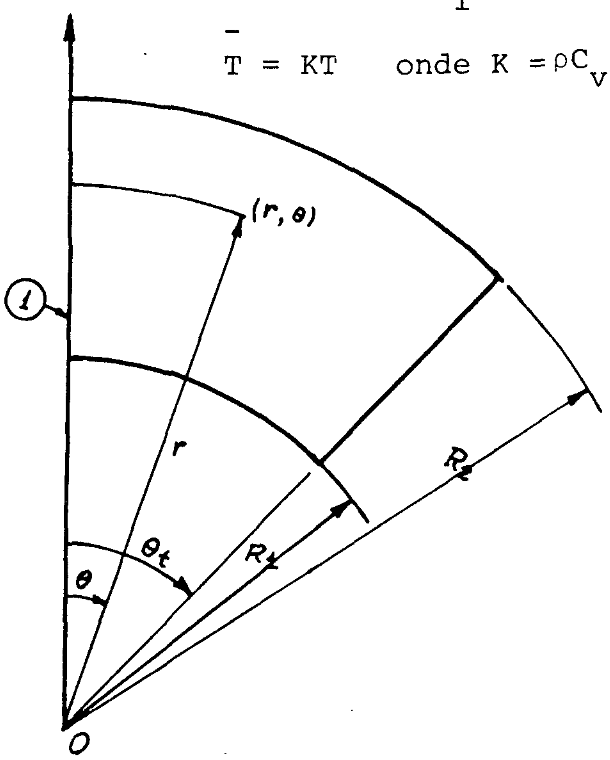


Fig. 3 - Posição do sistema de coordenadas polares em relação à sapata do mancal axial.

E estes reduzem as equações (2.6) e (2.7) ãs seguintes formas:

Equação da energia

$$\frac{\bar{\mu}\bar{r}^2}{3\bar{h}} + \frac{\bar{h}^{-2}}{\bar{\mu}}\left[\left(\frac{\partial \bar{P}}{\bar{r}\partial\theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{r}}\right)^2\right] =$$

$$\left(\bar{h} - \frac{\bar{h}^{-3}}{\bar{\mu}\,\bar{r}^2} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{\theta}}\right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{\theta}} - \frac{\bar{h}^{-3}}{\bar{\mu}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{r}} \qquad (2 .9)$$

Equação de Reynolds

$$\frac{\partial}{\partial \bar{r}}\left(\frac{\bar{r}\,\bar{h}^{-3}}{\bar{\mu}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{r}}\right) + \frac{\partial}{\bar{r}\,\partial\bar{\theta}}\left(\frac{\bar{h}^{-3}}{\bar{\mu}} \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{\theta}}\right) = \bar{r}\,\frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{\theta}} \qquad (2 .10)$$

As soluções destes conjuntos de equações, (2.4) e (2.5) e (2. 9) e (2. 10), serão obtidas em computador digital por meio de diferenças finitas.

2 . 3 - EQUAÇÕES DO SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO HIDRODINÂMICA EM DIFERENÇAS FINITAS

A seguir as equações de Reynolds da Energia serão transformadas em equações de diferenças finitas centrais.

2 . 3 . 1 - Coordenadas Retangulares

A aplicação das diferenças finitas centrais aos três termos da equação de Reynolds será feita tomando-se, para os termos de segunda ordem, a metade dos intervalos pivotais Δx e Δz, Fig.4, para evitar a expansão de suas moléculas computacionais. Assim, o primeiro termo da equação (2.5) será transformado em diferenças finitas do seguinte modo:

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial P}{\partial X}\right)_{i,j+1/2} - \left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial P}{\partial X}\right)_{i,j-1/2}}{2\,\frac{\Delta x}{2}}$$

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial P}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{\left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i,j+1/2}\frac{P_{i,j+1}-P_{i,j}}{\Delta x} - \left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i,j-1/2}\frac{P_{i,j}-P_{i,j-1}}{\Delta x}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial}{\partial X}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial P}{\partial X}\right)_{i,j} = \frac{\left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i,j+1/2}(P_{i,j+1}-P_{i,j}) - \left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i,j-1/2}(P_{i,j}-P_{i,j-1})}{(\Delta x)^2}$$

As barras foram eliminadas para simplificação de redação.

Analogamente, para o segundo termo, obteremos

$$\frac{\partial}{\partial Z}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial P}{\partial Z}\right)_{i,j} = \frac{\left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i,+1/2,j}(P_{i+1,j}-P_{i,j}) - \left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i-1/2,j}(P_{i,j}-P_{i-1,j})}{(\Delta z)^2}$$

Para o terceiro termo, sendo este de primeira ordem será considerado o intervalo normal de rede.

$$\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j-1}}{2\Delta x} \quad \ldots\ldots$$

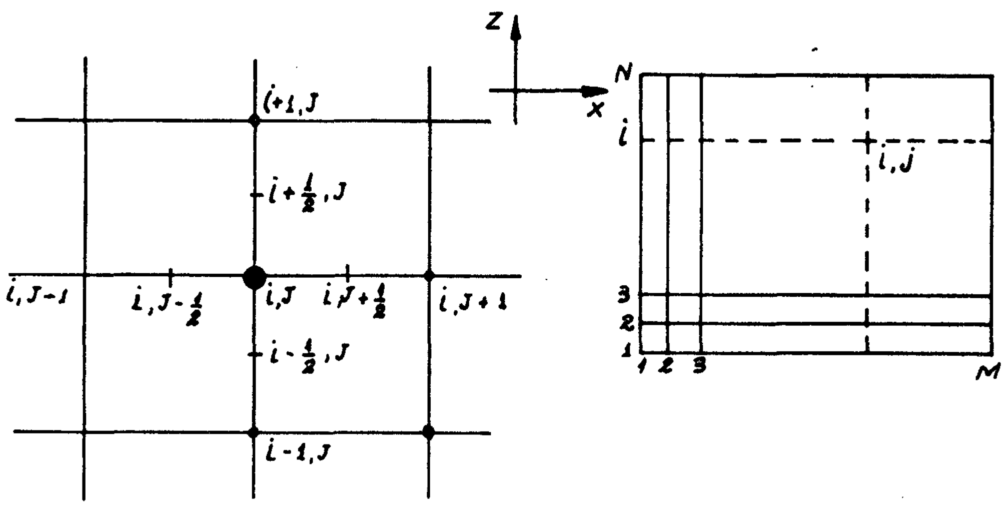


Fig. 4 . Indices usados no cálculo das pressões e temperaturas.

Compondo estes três termos e resolvendo para $P_{i,j}$, obtemos:

$$P_{i,j} = A_{i,j} \cdot P_{i+1,j} + B_{i,j} \cdot P_{i-1,j} + C_{i,j} \cdot P_{i,j-1} + D_{i,j} \cdot P_{i,j+1} + E_{i,j} \qquad (2.11)$$

onde

$$A_{i,j} = \left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i+\frac{1}{2},j} \cdot \left(\frac{\Delta x}{\Delta z}\right)^2 / \text{DENOM} \qquad (2.11a)$$

$$B_{i,j} = \left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i-\frac{1}{2},j} \cdot \left(\frac{\Delta x}{\Delta z}\right)^2 / \text{DENOM} \qquad (2.11b)$$

$$C_{i,j} = \left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i,j+\frac{1}{2}} / \text{DENOM} \qquad (2.11c)$$

$$D_{i,j} = \left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i,j-\frac{1}{2}} / \text{DENOM} \qquad (2.11d)$$

$$E_{i,j} = (h_{i,j-1} - h_{i,j+1})\Delta x/(2.\text{DENOM}) \qquad (2.11e)$$

Sendo o denominador destes coeficientes

$$\text{DENOM} = \left[\left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i-1/2,j} + \left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i+1/2,j}\right]\left(\frac{\Delta x}{\Delta z}\right)^2 + \left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i,j+1/2} + \left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i,j-1/2} \qquad (2.11f)$$

Da mesma forma a equação da energia é escrita na forma de diferenças finitas centrais

$$\left(\frac{\mu}{3h}\right)_{i,j} + \left(\frac{h^3}{}\right)_{i,j}\left[\left(\frac{P_{i,j+1} - P_{i,j-1}}{2\Delta x}\right) + \left(\frac{P_{i,+1,j} - P_{i-1.j}}{2\Delta z}\right)\right] =$$

$$\left[h_{i,j} - \left(\frac{h^3}{}\right)_{i,j}\left(\frac{P_{i,j+1} - P_{i,j-1}}{2\Delta x}\right)\right]\left(\frac{T_{i,j+1} - T_{i,j-1}}{2\Delta x}\right)$$

$$- \left(\frac{h}{\mu}\right)_{i,j}\left(\frac{P_{i+1,j} - P_{i-1,j}}{2\,\Delta Z}\right)\left(\frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2\,\Delta Z}\right)$$

e resolvida para $T_{i,j+1}$ resulta

$$T_{i,j+1} = \frac{2\Delta x\left\{\left(\frac{2\mu}{h}\right)_{i,j} + \left(\frac{6\,h^3}{\mu}\right)_{i,j}\left[\left(\frac{P_{i,j+1}\ P_{i,j-1}}{2\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{P_{i+1,j}\ \ P_{i-1,j}}{2\Delta z}\right)^2\right]\right.}{h_{i,j} - \left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i,j}\left(\frac{P_{i,j+1} - P_{i,j-1}}{2\Delta x}\right)} +$$

$$+ \frac{\left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i,j}\left(\frac{P_{i+1,j} - P_{i-1,j}}{2\Delta Z}\right)\left(\frac{P_{i+1,j} - P_{i-1,j}}{2\Delta Z}\right)\Big]}{h_{i,j} - \left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i,j}\left(\frac{P_{i,j+1} - P_{i,j-1}}{2\Delta x}\right)} + T_{i,j-1} \qquad (2\,.\,12)$$

2 . 3 . 2 - Coordenadas Polares

Aplicando-se as diferenças finitas centrais às equações de Reynolds e da energia em coordenadas polares obtem-se

$$P_{i,j} = A_{i,j}.P_{i+1,j}+B_{i,j}.P_{i-1,j}+C_{i,j}.P_{i,j+1}+D_{i,j}.P_{i,j-1}+E_{i,j} \qquad (2.13)$$

Para a equação de Reynolds, onde

$$A_{i,j}=\left(\frac{r\,h^3}{\mu}\right)_{i+1/2,J} \cdot \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta R}\right)^2 / \text{DENOM} \qquad (2.13)$$

$$B_{i,j} \left(\frac{r\,h^3}{\mu}\right)_{i-1/2,J} \cdot \left(\frac{\Delta\,\theta}{\Delta R}\right)^2 / \text{DENOM} \qquad (2.13\ b)$$

$$C_{i,j}= \left(\frac{h^3}{r\mu}\right)_{i.J+1/2} / \text{DENOM} \qquad (2\ .13\ c)$$

$$D_{i,j}= \left(\frac{h^3}{r\mu}\right)_{i,J-1} / \text{DENOM} \qquad (2\ .\ 13c\ )$$

$$E_{i,j} = r_{i,j}(h_{i,j-1}-h_{i,j-1})\Delta\theta/(2.\text{DENOM}) \qquad (2.\ 13\ e)$$

Sendo o denominador destes coeficientes

$$\text{DENOM} = \left[\left(\frac{rh^3}{\mu}\right)_{i-1/2,J}+\left(\frac{rh^3}{\mu}\right)_{i+1/2;J}\right]\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta r}\right)^2 + \left(\frac{h^3}{\mu r}\right)_{i,J+1/2}\left(\frac{h^3}{\mu r}\right)_{i,J-1/2}$$

$$(2.\ 13\ f)$$

A equação da energia ficará na forma

$$\left(\frac{\mu r^2}{3h}\right)_{i,j} + \left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i,j}\left[\left(\frac{P_{i,j+1}-P_{i,j-1}}{2\ r\ \Delta\theta}\right)^2 + \left(\frac{P_{i+1,j}-P_{i-1,j}}{2\ \Delta\ R}\right)^2\right] =$$

$$\left[h_{i,j}-\left(\frac{h^3}{\mu r}\right)_{i,J}\left(\frac{P_{i,j+1}-P_{i,j-1}}{2\ \Delta\ \theta}\right)\right]\left(\frac{{}_{i,j+1}-T_{i,j-1}}{2\ \Delta\ \theta}\right) +$$

$$= \left(\frac{h}{\mu}\right)_{i,j}\left(\frac{P_{i+1,j}-P_{i-1,j}}{2\ \Delta\ r}\right)\left(\frac{T_{i+1,j}-T_{i-1,j}}{2\ \Delta\ r}\right)$$

e resolvida para $T_{i,j+1}$ resulta

$$T_{i,j+1} = \frac{2\Delta\theta\left\{\left(\frac{\mu r^2}{3h}\right)_{i,J} + \left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i,J}\left[\left(\frac{P_{i,j+1}-P_{i,j-1}}{2\ r\ \Delta\theta}\right)^2 + \left(\frac{P_{i+1,j}-P_{i-1,j}}{2\ \Delta\ R}\right)^2\right]\right.}{\left[h_{i,j} - \left(\frac{h^3}{\mu r^2}\right)_{i,j}\left(\frac{P_{i,j+1}-P_{i,j-1}}{2\ \Delta\ \theta}\right)\right]} +$$

$$+ \frac{\left.\left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i,j}\left(\frac{P_{i+1,j}-P_{i-1,j}}{2\ \Delta\ R}\right)\left(\frac{T_{i+1,j}-T_{i-1,j}}{2\ \Delta\ R}\right)\right\}}{\left[h_{i,j} - \left(\frac{h^3}{\mu r^2}\right)_{i,j}\left(\frac{P_{i,j+1}-P_{i,j-1}}{2\ \Delta\ \theta}\right)\right]} + T_{i,j-1} \qquad (2.14)$$

2 . 4 - CÁLCULO DO CAMPO DE PRESSOÕES

A fórmula de diferenças finitas da equação de Reynolds será resolvida, por processo iterativo, para a obtenção dos valores da pressão em cada ponto (i.j) de uma malha disposta sobre a superfície da sapata. Com referência à equação (2. 11) e à Fig. 4, notamos que a pressão P (i,j) é expressa em termos dos valores vizinhos da pressão, viscosidade e altura do filme. Na fig. 5a., a área da sapata é dividida em um conjunto de M x N pequenas áreas $\Delta x . \Delta z$, no centro das quais serão calculados os valores da pressão.

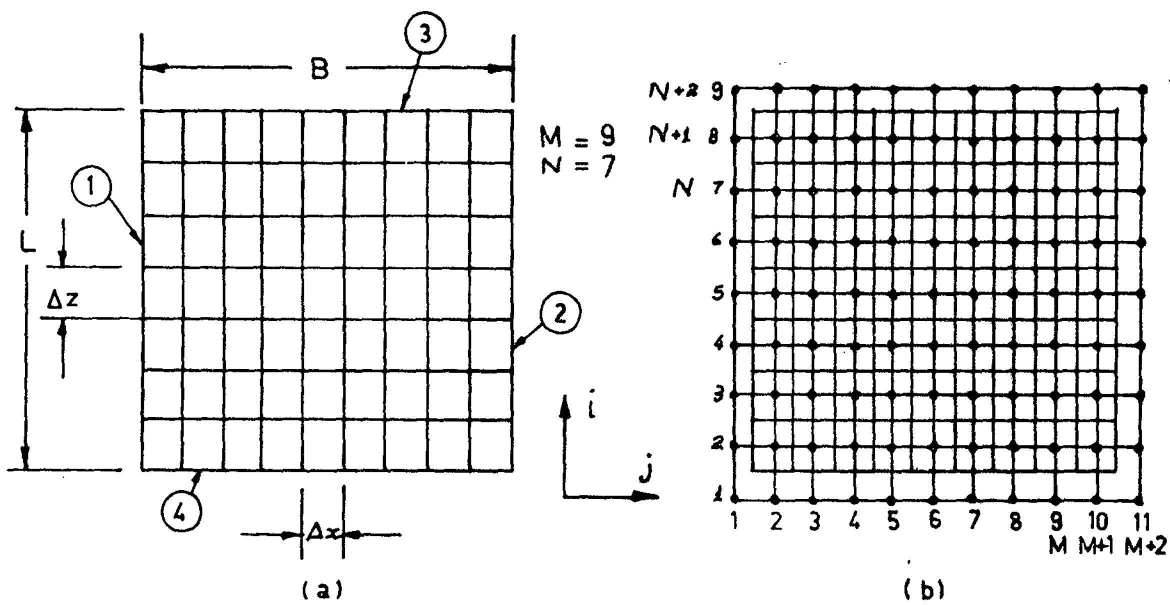


Fig. 5 . - Forma de aplicação da malha à sapata

A malha para aplicação das diferenças finitas será disposta de forma que cada ponto nodal coincida com o centro de uma área $\Delta x.\Delta z$, Fig. 4b, ficando, ainda, um conjunto de pontos circundando o contorno de sapata, que serão usados para o controle das condições de contorno. Nestes pontos, serão assumidos valores fictícios que nos permitirão simular estas condições. Assim, de acordo com a Fig. 4b, a malha de diferenças terá $(M+2)x(N+2)$ pontos (i,j) com

$$i = 1, N+2$$

$$j = 1, M+2$$

Dentro da área da sapata teremos MxN pontos (i,j)

com $i = 2, N+1$

e $j = 2, M+1$

Para simular as condições de contorno no cálculo da pressão em uma sapata finita ($P=0$ nas quatro arestas), os pontos fictícios assumirão sempre, após cada iteração, os valores simétricos de seus pontos correspondentes dentro da área da sapata. Em linguagem mais precisa, de acordo com a Fig. 5b., tem -se:

$$\begin{aligned} &P(1,J) = -P(2,J), \; J = 2, M+1 \\ &P(N+2,J) = -P(N+1,J), \; J = 2, M+1 \\ &P(I,1) = -P(I,2), \; I = 2, N+1 \qquad (2.15) \\ &P(I,M+2) = -P(I,M+1), \; I = 2, N+1. \end{aligned}$$

Para acelerar o processo de convergência será empregado um fator de aceleração que adiciona a cada valor calculado, uma fração de sua própria variação, ou seja

$$P^{K}_{i,j} = f(P^{K}_{i,j} - P^{K-1}_{i,j}) + P^{K-1}_{i,j} \qquad (2.16)$$

Adiantando alguns resultados colhidos, o fator de aceleração f pode variar entre 0,0 e 0,3, e deve ser tomado tanto menor quanto maior for a espessura mínima da película de óleo. Generalizando, este fator tem um valor ótimo próximo de 0,2, mas, se o campo de pressões não converge, ele deve ser diminuído, embora isto não implique fatalmente na convergência pois ela depende também de outros fatores. O processo iterativo será realizado até que a variação global dos valores da pressão seja menor do que um dado valor especificado e calculado por

$$\frac{\sum_{i=2}^{n+1} \sum_{j=2}^{m+1} \left[P^{K}_{i,j} - P^{K-1}_{i,j} \right|}{\sum_{i=2}^{n+1} \sum_{j=2}^{m+1} \left[P^{k}_{i,j} \right]} < \varepsilon \qquad (2.17)$$

Este valor deve convergir para ε a cada iteração. Se isto não ocorrer, significa que o fator de aceleração é muito grande, ou a configuração de dados, como veremos adiante, não está bem colocada.

2 . 5 - CÁLCULO DAS TEMPERATURAS

A equação de temperaturas será resolvida simultaneamente com a equação de Reynolds, pois, ela depende dos valores da pressão nos pontos i,j enquanto que a equação de Reynolds depende dos valores da viscosidade que são calculados a partir dos valores da temperatura. A obtenção das temperaturas não é um processo iterativo porque o valor da temperatura no ponto (i, j+ 1) é uma função dos pontos (i+1,j), (i-1,j) e (i,j-1). Como condição de contorno deve-se ter na aresta de entrada (aresta 1, Fig.5) o valor da temperatura do óleo quando este sai do sistema de resfriamento. Nas arestas 4 e 3 é feita uma aproximação das condições reais do mancal pela consideração do gradiente de temperaturas nulo. Na dedução da equação da energia, foi considerado que todo o calor gerado pelo cisalhamento seria armazenado em forma de calor no fluido. Isto implica que a temperatura deve crescer,continuamente, da aresta de entrada até as arestas de saída. A taxa de crescimento da temperatura, por sua vez, irá diminuindo da mesma forma porque a pressão cai a 0 (zero) nas arestas. Isto explica as condições impostas à temperatura nas arestas 4 e 3. Em termos de pontos pivotais, tem-se

$$T_{i,1} = T_{inicial}$$

$$T_{1,j} = T_{2,j}$$

$$T_{N+2,j} = T_{N+1,j}$$

2 . 6 - CÁLCULO DA VISCOSIDADE

A viscosidade é uma função da temperatura e da pressão. Esta função até hoje não está bem explicada e só se pode aproximá-la através de fórmulas empíricas. Muitas são as fórmulas empíricas para o relacionamento da viscosidade com a temperatura e pressão e mais ainda para o relacionamento exclusivo com a temperatura. Na referência [1 0] podem-se encontrar valores da viscosidade relacionados com pressão e temperatura de vinte tipos de óleos diferentes, testados na faixa de 25ºC a 90ºC e de 0 (Zero) a 950 Atm. O resultado para um destes tipos é apresentado na Tabela (1).

Tab.1. valores de $\log\mu$ para o óleo Sumatra.
TIN 6, fração 1,2

oC	PRESSÃO EM ATMOSFERA				
	0	300	500	750	950
25	1,099	1,358	1,523	1,733	1,891
40	0,854	1,100	1,249	1,427	1,569
65	0,572	0,772	0,898	1,049	1,165
90	0,355	0,535	0,646	0,776	0,876

Para mancais Hidrodinâmicos, onde se tem uma faixa de variação de 40 a 90ºC para a temperatura e de 0 (Zero) a 100 Atm para pressão, não será considerada a variação da viscosidade devido à pressão. Dentre as fórmulas μ versus T que se podem encontrar em toda bibliografia sobre lubrificante, foi escolhida a fórumula de Vogel (2. 18), por apresentar uma estrutura mais fácil para a utilização em FORTRAN e também por ser esta muito bem defendida por Cameron [6] que a verificou experimentalmente numa faixa de -10 a 95º C concluindo que sua precisão estava na mesma ordem de grandeza da precisão dos dados experimentais colhidos.

$$\mu = K.\ \mathrm{Exp}\ (b/(T+a)) \qquad (2.18)$$

Em (2.18) as constantes a, b e K são calculadas pelas expressões:

$$a = (P.TEMP2 - Q.TEMP3)/ (Q-P)$$

onde

$$P = \mathrm{Ln}\ (VISC1/VISC2)/\mathrm{Ln}\ (VISC1/VISC3)$$

$$Q = (TEMP2 - TEMP1)/(TEMP3-TEMP1)$$

e

$$b = \frac{\mathrm{Ln}\ (VISC1/VISC2)\ (TEMP\ 1+a)\ (TEMP\ 2 + a)}{TEMP\ 2 - TEMP\ 1}$$

VISC 1, VISC2 e VISC3 são três valores da viscosidade nas suas respectivas temperaturas TEMP1, TEMP2 e TEMP3.

Como as temperaturas serão determinadas nos pontos (i,j), as viscosidades serão calculadas nos mesmos pontos. Para a determinação dos seus valores nos pontos (i-1/2,j), (i+1/2,j) (i,j+1/2) e (i,j-1/2), necessários para o cálculo das pressões, será usada interpolação linear.

2 . 7 - O PROCESSO ITERATIVO

Para a determinação do campo de pressões a expressão (2.13) aplicada a cada ponto (i,j) da malha, vai gerar um sistema de MxN equações que será resolvido pelo método de Gauss-Seidel, onde os últimos valores calculados são usados no cálculo dos valores subsequentes. Assim, na k-ésima iteração do campo de pressões vamos ter

$$P^{k}_{i,j}= A_{i,j}\, P^{k-1}_{i+1,j} + B_{i,j}.P^{k}_{i-1,j}+C_{i,j}.P^{k}_{i,j-1}+D_{i,j}.P^{k-1}_{i,j+1}+ E_{i,j}$$

Os valores " acelerados " da pressão calculados pela expressão (2.16), não são incorporados imediatamente ao processo de cálculo, sendo as parcelas da variação

$$f(\, P^{k}_{i,j} - P^{k-1}_{1i,j} \,)$$

e

$$f(\, P^{k}_{i,j-1} - P^{k-1}_{i,j-1} \,) \;;\; i = 2,N+1$$

armazenados em dois vetores auxiliares, para serem acrescidos em seus respectivos lugares, após a passagem da área de atuação da molécula computacional que é de j-1 a j+1. Graficamente, os três estágios do campo de pressões, na k-ésima iteração, estão representados na Fig.6.

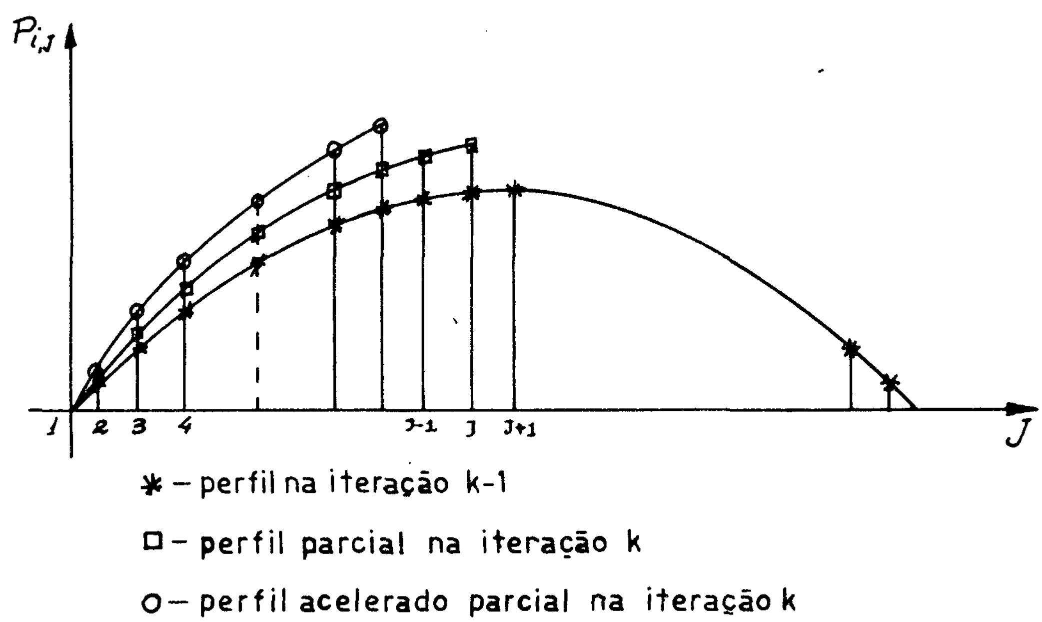


Fig. 6 - Três estágios do campo de pressões na k-ésima iteração.

Os valores fictícios para a simulação das condições de contorno, dados pelas expressões (2.15), são modificados após o cálculo de todos os valores da pressão dentro da área da sapata.

2 . 8 - CÁLCULO DA FORÇA, VAZÕES, PERDA DE POTÊNCIA E CENTRO DE PRESSÕES

2 . 8 . 1 - Força Resultante

Com o campo de pressões determinado será possível então, calcular outros fatores indicativos do desempenho da sapata. A capacidade de carga é obtida pela integração da pressão na área da sapata, ou seja

$$F = \int_o^B \int_o^L P_{dx} \; dz$$

e será calculada, discretamente, por

$$F = \sum_{i=2}^{N+1} \sum_{J=2}^{M+1} P_{i,j} \; \Delta x \; \Delta z$$

ou

$$F = \Delta x \; \Delta z \sum_{i=2}^{N+1} \sum_{J=2}^{M+1} P_{i,j} \qquad (\ 2.19\ )$$

Todos os índices usados neste item referem-se à Fig.5.

2 . 8 . 2 - Vazão de Lubrificante

Para a determinação da vazão de lubrificante que atravessa cada aresta da sapata, temos as expressões de escoamento unitário nas direções xez.

$$q_x = -\frac{h^3}{12\mu}\,\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{h}{2}\,U \qquad (2.20)$$

$$q_z = \frac{h^3}{12\mu}\,\frac{\partial P}{\partial z} \qquad (2.21)$$

Que devem ser integradas ao longo das arestas correspondentes para a determinação da vazão total. As vazões Q_1 e Q_2 serão determinados por

$$Q_1 = \int_0^L q_{x_1}\,dz \qquad (2.22)$$

$$Q_2 = \int_0^L q_{x_2}\,dz \qquad (2.23)$$

Enquanto que nas arestas 3 e 4, Q_3 e Q_4 serão dados por

$$Q_3 = \int_0^B q_{z_3}\,dx \qquad (2.24)$$

$$Q_4 = \int_0^B q_{z_4}\,dx \qquad (2.25)$$

Substituindo (2. 20) em (2. 22) e transformando a integral em somatório, teremos

$$Q_1 = \sum_{i=2}^{N+1} \left(- \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{h}{2} U \right)_{i,1.5} \Delta z$$

Os índices (i,1.5) representam os pontos da aresta 1. Analogamente, obteremos também

$$Q_2 = \sum_{i=2}^{N+1} \left(- \frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{h}{2} U \right)_{i,\,M+1.5} \Delta z$$

$$Q_3 = \sum_{j=2}^{M+1} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial Z} \right)_{i.5,j} \Delta x$$

$$Q_4 = \sum_{j=2}^{M+1} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial Z} \right)_{n+1.5,J} \Delta x$$

As derivadas $\partial P/\partial x$ e $P/\partial Z$ serão calculadas por meio de diferenças finitas centrais, em cada aresta, usando os pontos do contorno. Assim, pode-se escrever

$$\left.\frac{\partial P}{\partial x}\right|_{i,1.5} = \frac{P_{i,2} - P_{i,1}}{2 \frac{\Delta x}{2}}$$

mas, de acordo com (2. 15)

$$P_{i,1} = -P_{i,2}$$

o que transforma a expressão anterior em

$$\frac{\partial P}{\partial x}\bigg|_{i,1.5} = \frac{2\,P_{i,2}}{\Delta x}$$

Da mesma, obtem-se

$$\frac{\partial P}{\partial x}\bigg|_{i,M+1.5} = -\,\frac{2\,P_{i,N+1}}{\Delta z}$$

$$\frac{\partial P}{\partial z}\bigg|_{i,5,j} = \frac{2P_{2,j}}{\Delta z}$$

$$\frac{\partial P}{\partial z}\bigg|_{N+1.5,J} = \frac{2P_{N+1,j}}{\Delta z}$$

Os valores de h e μ, sobre as arestas, serão calculados por interpolação linear, ou seja, para as alturas tem-se

$$h_{i,1.5} = \frac{h_{i,2} + h_{i,1}}{2}, \qquad i = 2,\ N+1$$

$$h_{i,M+1.5} = \frac{h_{i,M+1} + h_{i,M+2}}{2}, \qquad i = 2,N+1$$

$$h_{1.5,j} = \frac{h_{i,j} + h_{2,j}}{2}, \qquad j = 2,M+1$$

$$h_{N+1.5,j} = \frac{h_{N+1,j} + h_{N+2,j}}{2}, \quad j = 2,M+1$$

Para as viscosidades é possivel fazer algumas simplificações. A viscosidade na aresta 1 é constante e igual à viscosidade inicial do óleo.

$$\mu_{i,1.5} = \mu_1$$

Nas demais arestas, de acordo com as condições de contorno assumidas para a equação de temperaturas, as temperaturas nos pontos do contorno " ficticio " são iguais às temperaturas dos seus pontos correspondentes dentro da área da sapata e, consequentemente, suas viscosidades são iguais, assim

$$\mu_{i,+1.5} = \frac{\mu_{i,M+1} + \mu_{i,M+2}}{2} = \mu_{i,M+1}$$

Da mesma forma

$$\mu_{1.5,J} = \mu_{2,j}$$

$$\mu_{N+1.5,J} = \mu_{N+1,J}$$

Assim, as equações da vazão em cada aresta serão:

$$Q_1 = \frac{\Delta Z}{4} \sum_{i=2}^{N+1} \left[- \frac{1}{12} \frac{(h_{i,2} + h_{i,j})^3}{\mu_{i,1}} \frac{P_{i,2}}{\Delta x} + (h_{i,2} + h_{i,j}) U_i \right] \qquad (2.26)$$

$$Q_2 = \frac{\Delta z}{4} \sum_{i=2}^{n+1} \left[- \frac{1}{12} \frac{(h_{i,M+1} + h_{i,M+2})^3}{\mu_{i,M+1}} \frac{P_{i,M+1}}{\Delta x} + (h_{i,M+1}\ h_{i,M+2}) \right] \qquad (2.27)$$

$$Q_3 = \frac{\Delta x}{48} \sum_{j=2}^{m+1} \left[\frac{(h_{1,j} + h_{2,j})^3}{\mu_{2,J}} \frac{P_{2,j}}{\Delta 2} \right] \qquad (2.28)$$

$$Q_4 = \frac{\Delta x}{48} \sum_{j=2}^{m+1} \left[\frac{(h_{N+1,j} + h_{N+2,j})^3}{\mu_{N+1,j}} \frac{P_{N+1,j}}{\Delta Z} \right] \qquad (2.29)$$

2 . 8 . 3 - Perda de Potência

A perda de potência por atrito, uma vez assumindo que todo calor gerado será armazenado no óleo, é função da elevação de temperatura e da vazão e é dada por

$$P_{watts} = \gamma \cdot C_v \cdot \Delta T \cdot Q$$

Esta expressão será calculada em três etapas, uma para cada aresta de saida do óleo, na forma

$$P_2 = \gamma C_v \int_0^L q_{x_2} (T_1 - T_2) \, dz$$

$$P_3 = \gamma C_v \int_0^B q_{z_3} (T_1 - T_3) \, dx$$

$$P_4 = \gamma C_v \int_0^B q_{z_4} (T_1 - T_4) \, dx$$

Onde T_1 é a temperatura constante da aresta 1 e T_2 T_3 e T_4 são as temperaturas variáveis das arestas 2, 3 e 4, respectivamente. Substituindo as expressões de q_{x_2}, q_{z_3} e q_{z_4} e transformando as integrais em somatórios obteremos

$$P_2 = \frac{\gamma\, c_v\, \Delta z}{4} \sum_{i=2}^{n+1} \{ [- \frac{1}{12} \frac{(h_{i,M+1} + h_{i,M+2})^3}{\mu_{i,\,M+1}} \frac{P_{i,m+1}}{\Delta x} + (h_{i,m+1} + h_{i,m+2}) U_i] \, (T_1 - T_{i,m+1}) \} \qquad (2.30)$$

$$P_3 = \frac{\gamma C_v\, \Delta x}{48} \sum_{j=2}^{m+1} [\frac{(h_{i,j} + h_{2,j})}{\mu_{2,j}} \frac{P_{2,j}}{\Delta .} (T_1 - T_{2,j})] \qquad (2.31)$$

$$P_4 = \frac{\gamma\, c_v \Delta x}{48} \sum_{j=2}^{m+1} [\frac{(h_{N+1,j} + h_{n+2,j})^3}{\mu_{n+1,}} \frac{P_{n+1,j}}{\Delta z} (T_1 - T_{n+1,j})] \qquad (2.32)$$

2 . 8 . 4 - Centro de Pressões

A posição do centro de pressões será calculada pelo equilíbrio dos momentos da força resultante (2.19) e de $P_{i,j}$. Δx . Δz, em relação às arestas 1 e 4, ou seja

$$F\bar{x} = \sum_{i=2}^{N+1} \sum_{j=2}^{M+1} P_{i,j} (\Delta x)^2 \Delta z . (j-1.5)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=2}^{N+1} \sum_{j=2}^{M+1} P_{i,j} (\Delta x)^2 \Delta z . (j-1.5)}{F} \qquad (2.33)$$

Analogamente

$$\bar{z} = \frac{\sum_{i=2}^{n+1} \sum_{i=2}^{m+1} P_{i,j} \Delta x . (\Delta z)^2 (i-1.5)}{F} \qquad (2.34)$$

2 . 8 . 5 - Força, Potência, Centro de Pressões em Coordenadas Polares

Em coordenadas polares a determinação da força, vazão e perda de potência é análoga às deduções anteriores feitas para uma sapata retangular, considerando-se apenas que as áreas, sobre as quais está centrado $P_{i,j}$, são dadas por $R_i . \Delta\theta . \Delta R$. Assim, a expressão (2.19) em coordenadas polares será

$$F = \sum_{i=2}^{N+1} \sum_{j=2}^{M+1} \Delta\theta . \Delta R . P_{i,j} . R_i \qquad (2.35)$$

As expressões (2.26) a (2.29) se transformarão em

$$Q_1 = \frac{\Delta R}{4} \sum_{i=2}^{N+1} \left[- \frac{1}{12} \frac{(h_{i,2} + h_{i,1})^3}{\mu_{i,j}} \frac{P_{i,2}}{R_i \Delta\theta} + (h_{1,2} + h_{i,1}) U_1 \right] \quad (2.36)$$

$$Q_2 = \frac{\Delta R}{4} \sum_{i=2}^{N+1} \left[- \frac{1}{12} \frac{(h_{i,M+1} + h_{i,M+2})^3}{\mu_{i,M+1}} \frac{P_{i,M+1}}{R_i \Delta\Theta} + (h_{i,M+1} + h_{i,M+2}) \right]$$

(2.37)

$$Q_3 = \frac{\Delta\Theta}{48} \sum_{j=2}^{M+1} \left[\frac{(h_{1,j} + h_{2,j})^3}{\mu_{2,j}} \frac{R_i \, P_{2,j}}{\Delta R} \right] \quad (2.38)$$

$$Q_4 = \frac{\Delta\,\Theta}{48} \sum_{j=2}^{M+1} \left[\frac{(h_{n+1} + h_{n+2,j})^3}{\mu_{n+1,j}} \frac{R_i \, P_{n+1,j}}{\Delta R} \right] \quad (2.39)$$

As três parcelas da perda de energia, (2.30), (2.31) e (2.32) terão suas expressões correspondentes em coordenadas polares na forma

$$P_2 = \frac{\gamma C_v \Delta z}{4} \sum_{i=2}^{N+1} \{[- \frac{1}{12} \frac{(h_{i,M+1}+h_{i,m+2})^3}{\mu_{i,M+1}} \frac{P_{i,m+1}}{R_i \Delta\theta} + (h_{i,m+1} + h_{i,m+2})]$$

$$(T_1 - T_{i,m+1})\} \qquad (2.40)$$

$$P_3 = \frac{\gamma C_v \Delta\theta}{48} \sum_{j=2}^{m+1} \{[\frac{(h_{1,j}+h_{2,j})^3}{\mu_{2,j}} \frac{R_{1.5} + P_{2,j}}{\Delta R}](T_1 - T_{2,j})\} \qquad (2.41)$$

$$P_4 = \frac{\gamma C_v \Delta\theta}{48} \sum_{j=2}^{m+1} \{[\frac{(h_{n+1,j}+h_{n+2,j})^3}{\mu_{n+1,j}} \frac{R_{N+1.5} \cdot P_{n+1,j}}{\Delta R}](T_1 - T_{n+1,j})| \qquad (2.42)$$

A determinacão das coordenadas do centro de pressão assume, em coordenadas polares, um aspecto bastante diferente da determinação de $\overline{x}$ e $\overline{z}$ que deu origem às expressões (2.33) e (2.34), com a Fig.7.

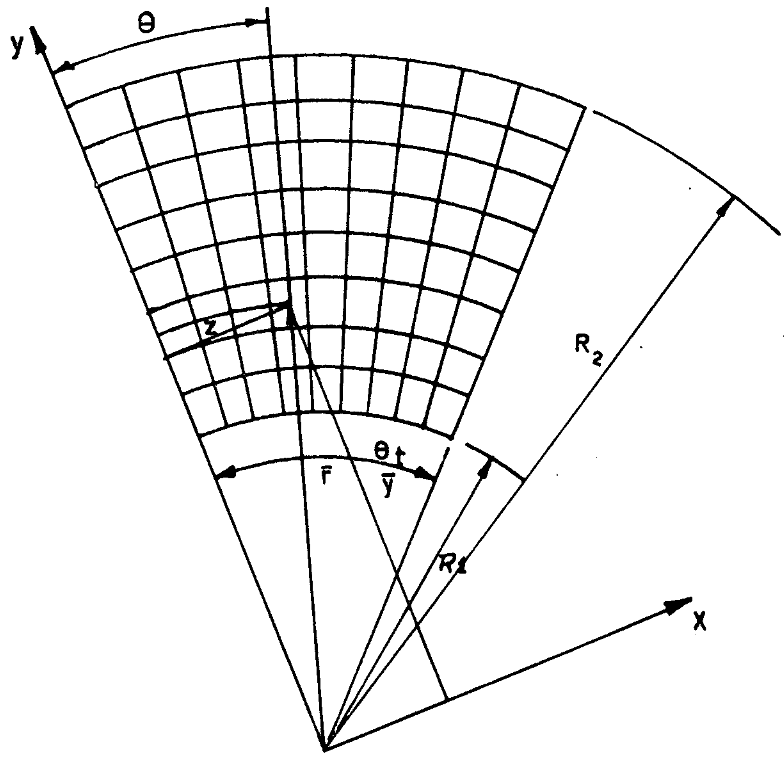


Fig. 7 - Sistema de coordenadas usadas para a determinação do centro de pressão de sapatas de mancal axial.

Sejam $\bar{x}$ e $\bar{y}$ as coordenadas do centro de pressão em relação aos eixos x e y. Somando os momentos das forças em relação ao eixo x, obtem-se

$$\bar{F}x = \sum_{i=2}^{N+1} \sum_{J=2}^{M+1} P_{i,j} \cdot R_i \Delta\Theta\Delta R.\ R_i \text{ sen } \theta_j = 0$$

$$\therefore \quad \bar{x} = \frac{\Delta\Theta.\Delta R \sum \sum P_{i,j} . R_i^2 . \text{ sen } \theta_j}{F}$$

mas, θj pode ser escrito na forma

$$\theta_{z_j} = \frac{R_i \cdot \Delta\Theta(j - 1.5)}{R_i}$$

ficando, finalmente

$$\bar{x} = \frac{\Delta\Theta . \Delta R \; \Sigma \; \Sigma \; P_{i,j} . R_i^2 - sen(j-1.5)\Delta\Theta)}{F}$$

(2.43)

Da mesma forma tem-se

$$\bar{y} = \frac{\Delta \; \Theta . \Delta R \; \Sigma\Sigma \; R_i^2 \; . \; P_{i,j} . \; cos((\; j-1.5 \;)\Delta\Theta)}{F} \qquad (\; 2.44 \;)$$

As coordenadas do centro de pressão, em relação ao sistema polar serão determinadas por

$$\bar{R} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \qquad (\; 2.45 \;)$$

$$\bar{\theta} = sen^{-1}\left(\frac{\bar{x}}{\bar{R}}\right) \qquad (\; 2.46 \;)$$

2 . 9 - COMPATIBILIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE COORDENADAS

Pela observação das fórmulas apresentadas em coordenadas polares e as suas correspondentes em coordenadas retangulares, pode-se notar que, a despeito das naturezas diferentes dos intervalos de variação de suas coordenadas - Δx linear e $\Delta\Theta$ angular - há uma grande semelhança entre elas. Veja-se, por exemplo, as expressões (2.11b) e (2.13b)

$$B_{i,j} = \left(\frac{h^3}{\mu}\right)_{i-1/2,j} \left(\frac{\Delta x}{\Delta z}\right)^2 / \text{DENOM} \qquad (2.11\text{ b})$$

$$B_{i,j} = \left(\frac{rh^3}{\mu}\right)_{i-1/2,j} \left(\frac{\Delta \theta}{\Delta R}\right)^2 / \text{DENOM} \qquad (2.13\text{ b})$$

A uniformização dos intervalos, chamado de Δj a variação unitária na direção do movimento do mancal e Δi, a variação unitária na direção perpendicular, vai tornar as duas expressões acima iguais, a não ser pela inclusão da variável r na expressão (2.13b). Esta constatação pode ser verificada em todas as equações representadas em termos discretos, desde a equação de Reynolds até a equação (2.41) da parcela P_4 da perda de energia. O cálculo do centro de pressões não entra nesta analogia. Como exceção, apenas nas expressões (2.12) e (2.14) os coeficientes numéricos dos termos assinalados por setas, nas duas equações, divergem. Este fato permite elaborar um programa computacional, compacto, que utiliza as mesmas declarações aritméticas no cálculo de mancais axiais e radiais reduzindo em quase 50% o tamanho do programa. Ao se calcular um mancal radial, onde é usado um sistema de coordenadas retangulares, a variável T_i assumirá o valor 1,0 para todo i= 1,M+2. Alguns artifícios usados na aplicação desta homogeneização, vão desde a criação de variáveis extras-como DDR (ver programa) que vale 0 (zero) para mancais radiais e ΔR para man cais axiais - até a denominação indiscriminada de declividade, tanto para declividade de uma sapata como para a excentricidade de um eixo. Uma descrição detalhada de todos estes artifícios seria bastante cansativa para um trabalho desta natureza. Os interessados no programa podem distingui-los e estudá-los, posteriormente, com alguma facilidade.

CAPÍTULO III

TIPOS DE SAPATAS

3 . 1 - INTRODUÇÃO

A capacidade de suportar carga de um mancal hidrodinâmico é proporcionada pelo arraste de um fluido para dentro de uma região convergente, provocando um efeito de cunha. Nos mancais radiais plenos esta região convergente aparece naturalmente pela excentricidade do eixo, enquanto que nos mancais axiais dever ser provocada artificial e descontinuamente por elementos chamados sapatas. Estas também podem ser aplicadas a mancais radiais dando -lhes algumas características muito importantes. Os mancais radiais de sapatas pivotadas tem a propriedade de compensar as deflexões ou desalinhamentos dos eixos e podem suportar cargas relativamente altas nos casos em que estes fatores são consideráveis [5]. Neste capítulo, os diversos tipos de sapatas e as equações que as representam, serão estudados em termos discretos, ou seja, em termos dos pontos pivotais da malha de diferenças finitas.

3 . 2 - MANCAL AXIAL DE SAPATAS FIXAS

O tipo mais simples de sapata para mancal axial é um plano inclinado de comprimento B e largura L como o mostrado na Fig.8, numa vista lateral. Esta pode ser representada matematicamente em relação à superfície deslizante D, através das alturas H_1 e h_2.

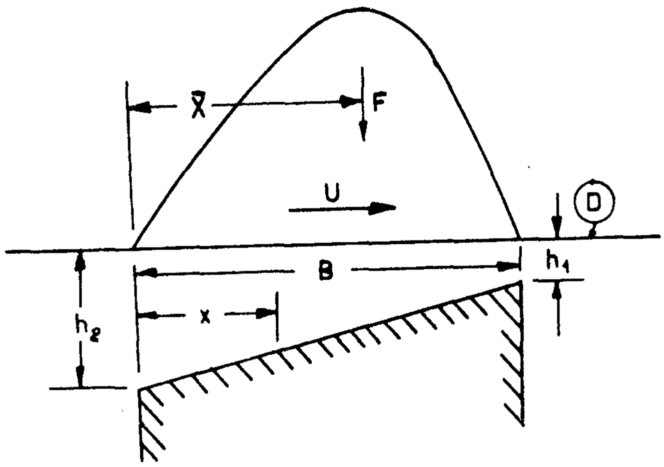


Fig.8 - Sapata fixa de um mancal axial.

Pode-se escrever então:

$$h(x) = h_1 + (1-x/B) (h_2 - h_1)$$

Observando-se a disposição da malha sobre a sapata Fig.9, temos que B = MΔx, e

$$B = M\Delta x, \text{ e}$$

$$x = (j - 1,5) \Delta x$$

Assim, a equação de alturas fica na forma

$$h (j) = h_i + (1 - (j - 1.5)/M) (h_2 - h_1) \quad (3.1')$$

válida para qualquer i.

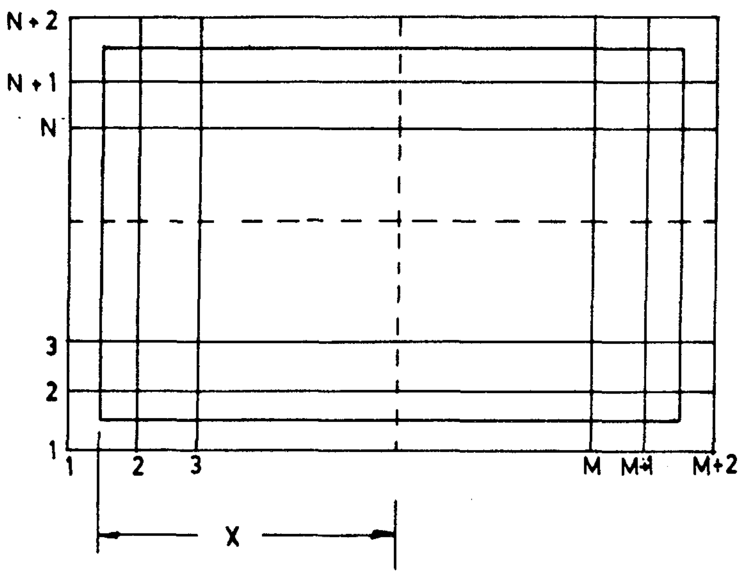


Fig. 9 - Disposição da malha de diferenças finitas sobre uma sapata.

Note-se que a expressão (3.1), embora tenha sido estabelecida para uma sapata de área retangular, serve também para o setor de anel de um mancal radial, pois, ela é função do número j e não de intervalos Δx ou $\Delta\theta$.

Sapatas de acordo com a Fig.8, representáveis pela equação (3.1), e sua variante mais próxima mostrada na Fig.10 , são os tipos mais fáceis de se obter em qualquer torno detalonador.

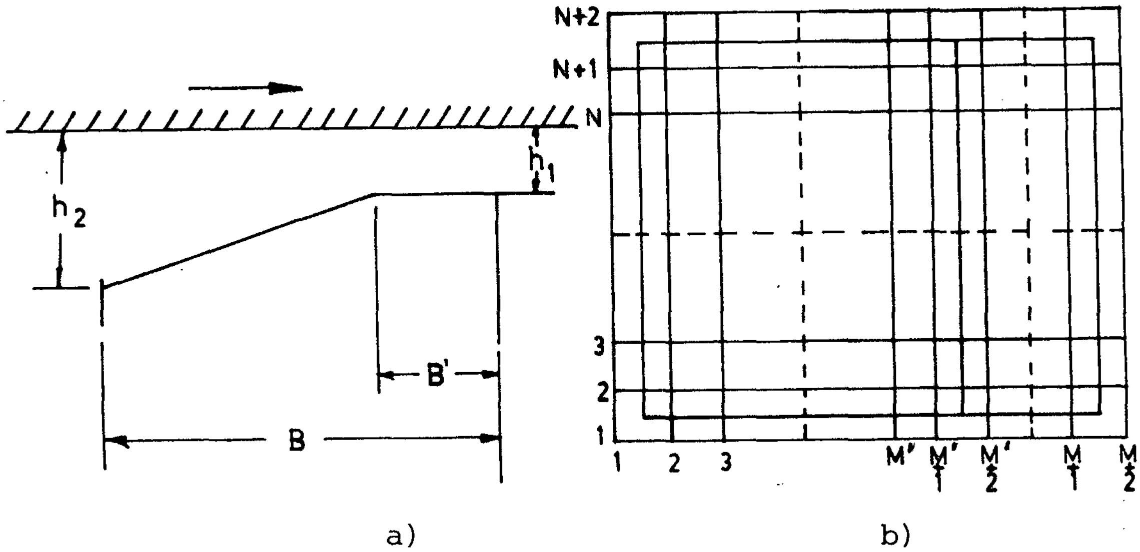


Fig.10 - Sapata inclinada com patamar de sustentação.

A impraticabilidade da sapata da Fig.8 reside no fato de que ela não tem capacidade de suportar o eixo quando este está parado. Portanto, o perfil mais empregado é o mostrado na Fig.10a. Para a utilização no programa, a interseção da parte plana com a parte inclinada deve ficar no meio de um intervalo Δx ou $\Delta\theta$ (Fig. 10b), de forma a termos M'linhas dentro da área inclinada. A equação 3.1 passará a ser então

$$h (j) = h_1 + (1-(j-1.5)/ M') (h_2-h_1) \quad (3.2)$$

$j = 1, M'$ e qualquer i

$h (j) = h_1$, $j = M'+1, M'+2$, e qualquer i

Outro tipo de sapata fixa para mancal axial está mostrado na Fig.11 e tem inclinação nos dois sentidos : r e θ. Esta sapata pode ser representada por

$$h\ (x,z) = h_1+(1- \frac{x}{B})(h_3-h_1) - (1- \frac{x}{B})(1- \frac{z}{L})(h_3 - h_2)$$

ou, em termos de i, j

$$h(i,j)= h_1+(1- \frac{(j-1.5)}{M})(h_3-h_1)-(1- \frac{(j-1.5)}{M})(1- \frac{(i-1.5)}{L})\ (h_3-h_2) \qquad (3.3)$$

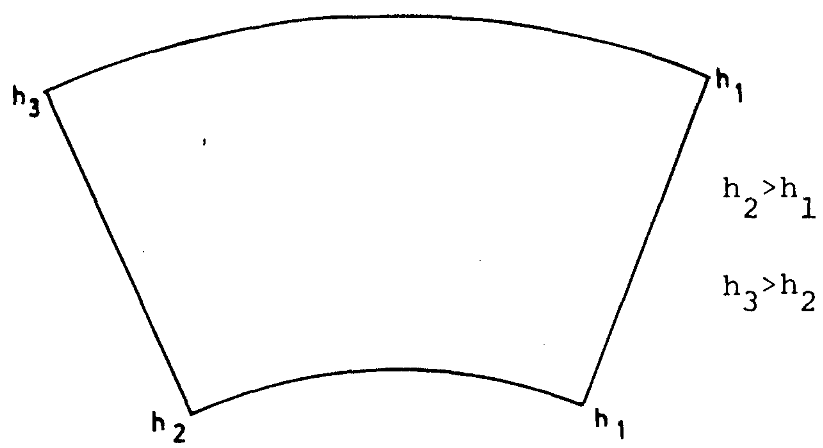


Fig. 11 - Sapata para mancal radial com inclinação nas direções r e θ

Há uma infinidade de tipos de sapatas fixas para o projetista escolher a que melhor se adapte ao seu projeto ou à sua capacidade de realização prática. Na Fig.12 ve-se mais alguns tipos de sapatas do tipo unidirecional e na Fig.13 sapatas que permitem o movimento nos dois sentidos.

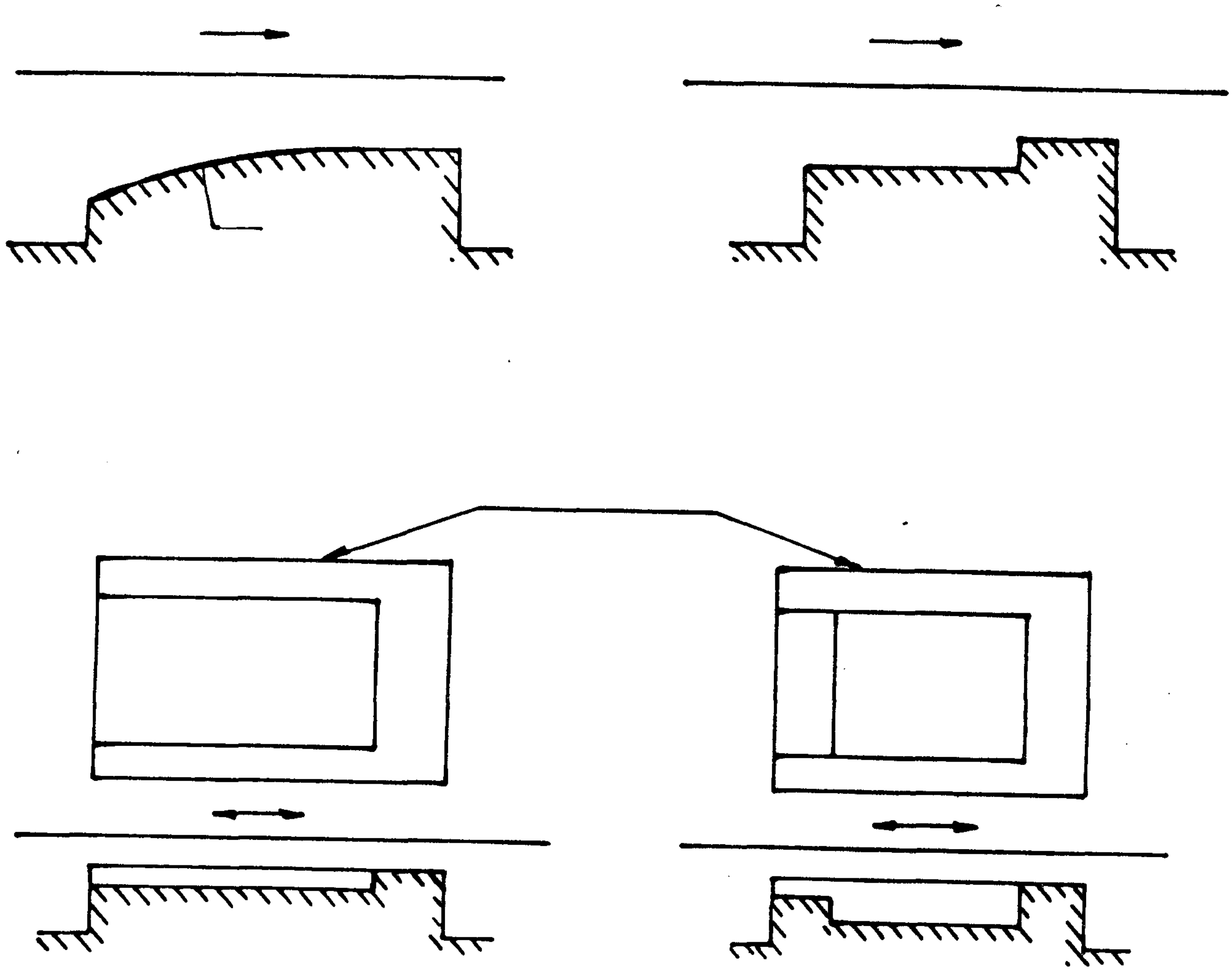


Fig. 12 - Sapatas fixas unidirecionais.

Uma descrição mais detalhada de cada um destes tipos quanto à sua capacidade de carga pode ser encontrada nas referências [3],[5] e [8] e foge ao objetivo do presente trabalho.

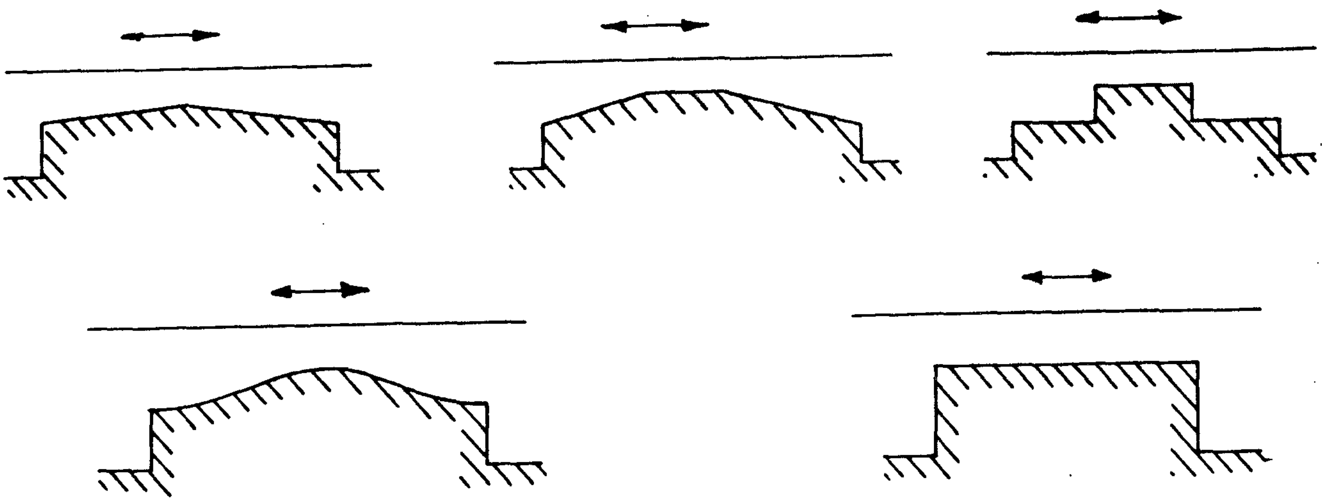


Fig. 13 - Sapatas fixas bidirecionais.

3 . 3 - SAPATAS PIVOTADAS - PARA MANCAIS AXIAIS

O tipo mais comum de sapata pivotada é o mostrado na Fig.14. Ela é representada por um plano que pode bascular sobre um pivô P. Este pivô, proporciona a máxima capacidade de carga, para sapatas de largura infinita, quando é colocado na posição

$$\bar{x} = 0.59\ B.$$

como pode ser visto em [3]

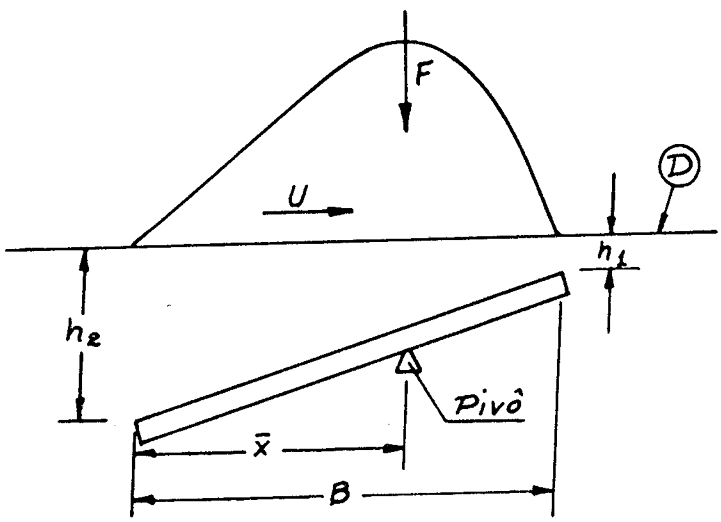


Fig . 14 - Sapata plana pivotada.

Um dos objetivos deste trabalho é determinar o valor da relação $\bar{x}/B$ que proporcione a máxima carga para uma sapata de largura finita. Para isto será estabelecido o seguinte processo:

A altura mínima h_1, que é um parâmetro facilmente controlável, será fixada e a sapata posta em posição paralela à superfície móvel D. A seguir, a sapata é inclinada progressivamente, girando em torno do ponto a, Fig. 15, até que se obtenha, por integração do campo de pressões gerado, a força máxima. Neste ponto é calculado o centro de pressões onde é, então, estabelecido o pivô.

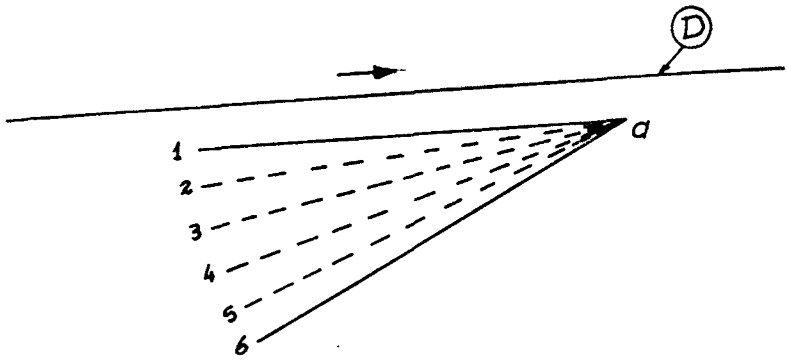


Fig. 15 - Inclinação controlada de uma sapata pivotada.

Pelo fato de que as alturas são muito pequenas em relação ao comprimento, a inclinação pode ser obtida fixando-se h_1 e variando h_2, ou por uma fórmula baseada na declividade como segue:

$$h(j) = h_1 + (j-1.5)/M). B. DECLIVE \qquad (3 .4)$$

As sapatas pivotadas podem ter também diversas formas como as mostradas na Fig.16, sendo a variação mais comum o tipo da Fig.16a.. Esta é, inclusive, a forma mais próxima de uma sapata plana deformada devido à distribuição de pressões em torno de um pivô linear [5].

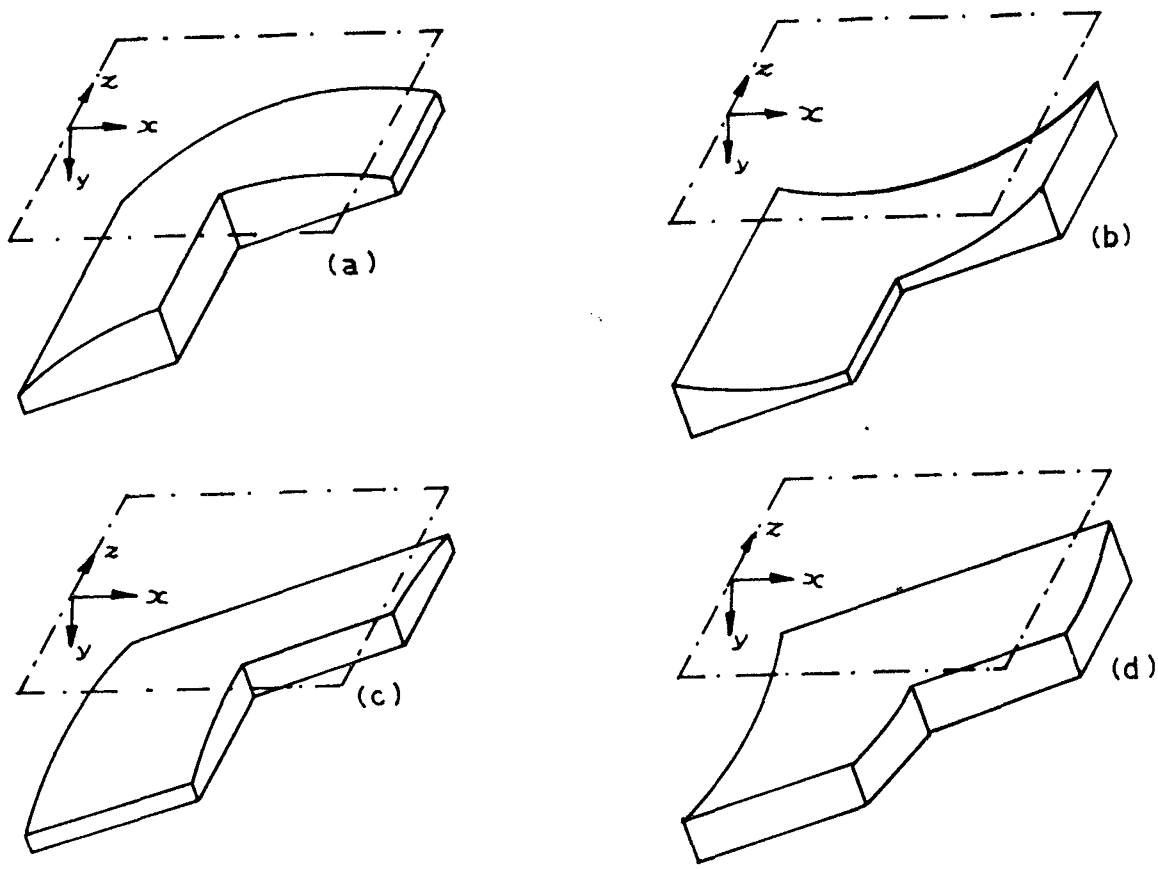


Fig. 16 - Formas Especiais de Sapatas

Também a sapata convexa apresenta uma característica muito interessante. Para se obter a reversibilidade de rotação, há a necessidade da colocação do pivô no centro da sapata. Isto , como pode ser notado na Fig.17, provoca uma queda sensível na capacidade de carga das sapatas planas, enquanto que, a capacidade da sapata convexa de pivô centrado é bem próxima da capacidade da sapata plana de pivô otimizado (5).

Teoricamente uma sapata plana com pivô centrado tem capacidade de carga nula mas, na prática, devido a variações de densidade e viscosidade do fluido ao longo da sapata, elas poderiam ser usadas com esta disposição.

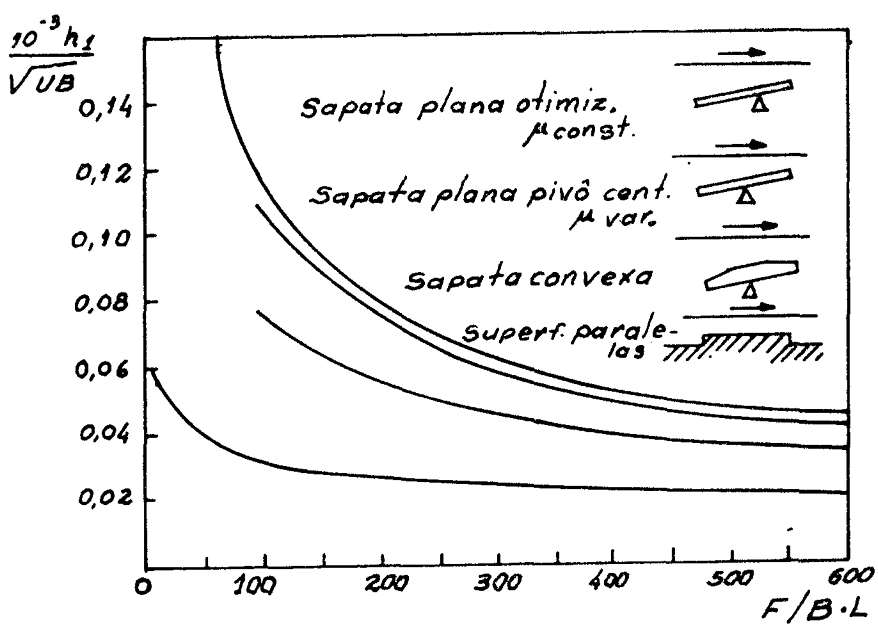


Fig. 17 - Comparação quanto à capacidade de carga de alguns tipos de sapatas [5].

3 . 4 - SAPATAS PIVOTADAS PARA MANCAIS RADIAIS

Enquanto em mancais axiais as expressões para a altura do filme podem assumir diversas formas, em mancais radiais a fórmula é universal. Com referência à Fig.18, esta fórmula é

$$h = C + e. \cos \theta \qquad (3.5)$$

onde C é a folga do mancal

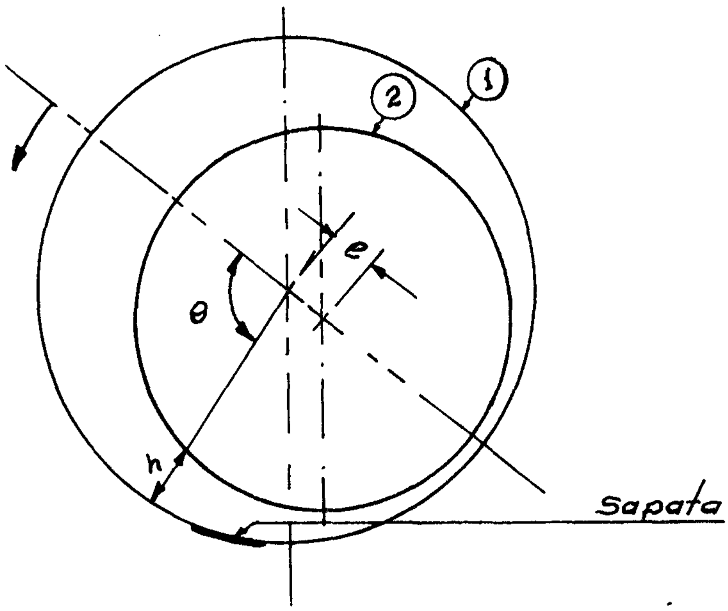


Fig. 18 - Folga num mancal radial pleno.

Uma sapata de mancal radial é uma parte do círculo 1 da Fig.18 e, no conjunto, aparece como mostrado na Fig. 19. Nesta figura, considerando apenas uma sapata, podemos distinguir três circunferências básicas: a circunferência do eixo, dos pivôs e da curvatura da sapata.

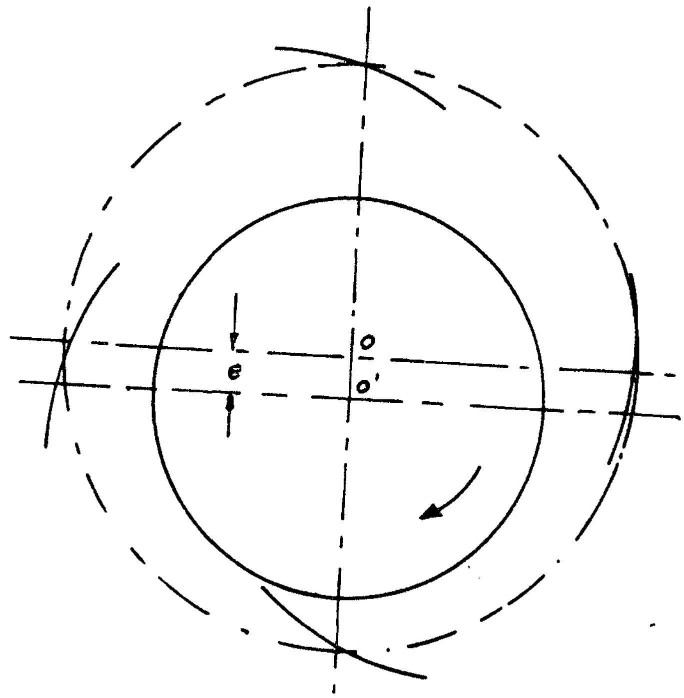


Fig. 19 - Disposição característica de um mancal radial com 4 sapatas pivotadas.

A origem dos ângulos θ assume uma posição diferente para cada inclinação da sapata e deve ser determinada antes do cálculo das alturas. Esta determinação, por uma contingência do programa, deve ser feita por dois processos diferentes que se pode chamar de processo A e processo B. No processo A, analogamente, como no caso de uma sapata plana, a determinação da origem e, consequentemente, o cálculo das alturas, será feito tendo por base dois valores conhecidos de h que são hl e hp; hl é a altura mínima dada e hp a altura sobre o pivô. Como hl é fixo, será a variação de hp que vamos variar a inclinação (excentricidade) da sapata. No processo B vamos controlar diretamente a excentricidade da sapata fazendo-a girar sobre o pivô, cuja altura - hp, permanece constante. Os esquemas a) e b) da Fig.20 serão usados para a determinação do ângulo $\hat{b}$- posição da origem em relação ao pivô - nos dois processos, respectivamente.

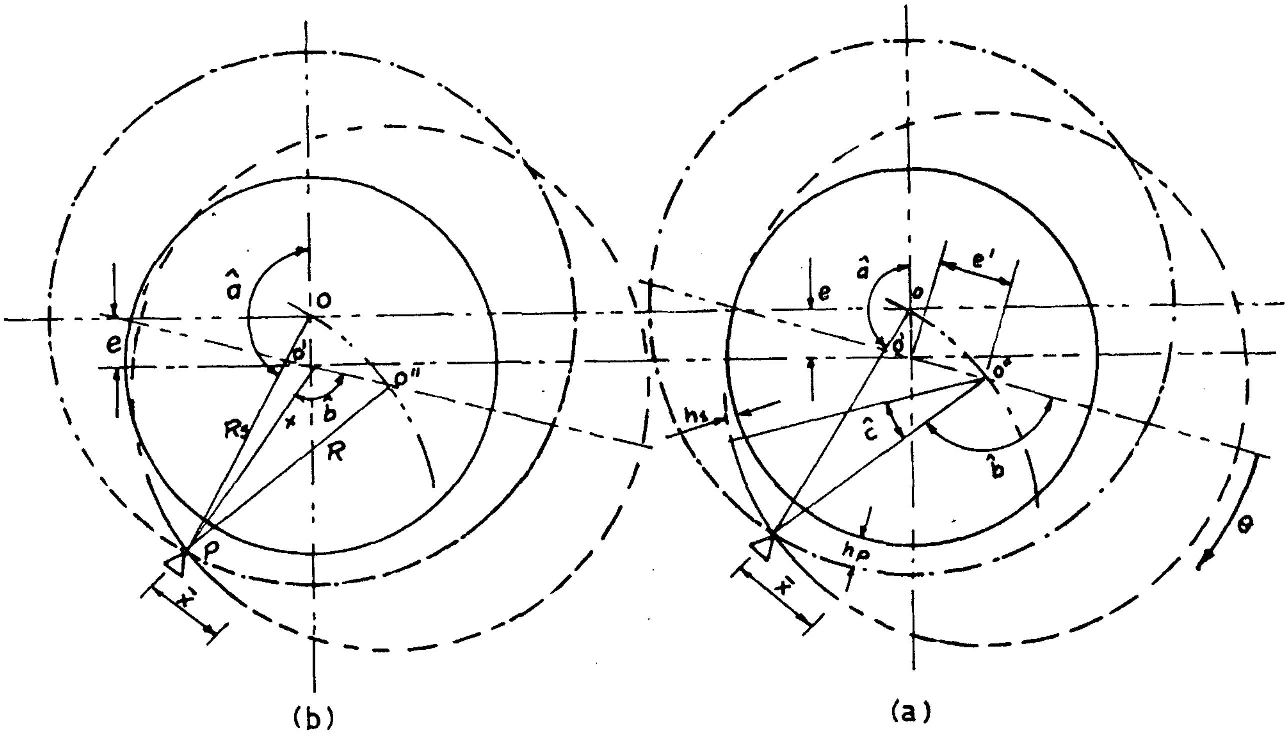


Fig. 20 - Esquemas para a determinação de origem dos ângulos.

Para o processo A, segundo o esquema a) da Fig.20 pode-se escrever

$$hp = C + e' . \cos(\hat{a}) \qquad (3.6)$$

$$hp = C + e' . \cos(\hat{b}) \qquad (3.7)$$

$$hl = C + e' . \cos(\hat{b} + \hat{c}) \qquad (3.8)$$

De (3.7) e (3. 8) tira-se

$$\frac{hp - C}{\cos(\hat{b})} = \frac{hl - C}{\cos(\hat{b} + \hat{c})}$$

Aplicando a fórmula trigonométrica da soma de dois arcos e resolvendo para $\hat{b}$ obtemos

$$Tg(\hat{b}) = (\cos(\hat{c}) - (h1 - C)/ (hp-C)/Sen (\hat{c}) \qquad (3.9)$$

Sendo hp calculado por (3.6) e $\hat{c}$ dado por

$$\hat{c} = (B - \bar{x})/ Rs$$

onde Rs é o raio da sapata e igual ao raio do círculo de pivôs.

Para o processo B, no esquema b) da Fig.20, $\overline{OO'}$ é a excentricidade do eixo em relação ao círculo de pivôs, enquanto $\overline{O'O''}$ é a excentricidade em relação à sapata, e a origem deve ser expressa em função deste valor. Assim, pelo triângulo O'O'' p podemos escrever

$$\hat{b} = \text{Arc} \cos ((x^2 + \overline{O'O''}^2 - Rs)/(2.x.\overline{O'O''})) \qquad (3.10)$$

onde x é obtido do triângulo OO'p

$$x^2 = Rs^2 + \overline{OO'}^2 - 2.Rs.\overline{OO'}. \cos(\hat{a})$$

Para a obtenção de h em função de j é preciso determinar o ângulo correspondente a j=1, que é o ângulo $\hat{b}1$ na Fig.21 e também o intervalo $\Delta\hat{b}$. O valor de h (j) será, então, dado por

$$h(j) = C+e.\cos(\hat{b}1 + (j-1)\Delta\hat{b}) \qquad (3.11)$$

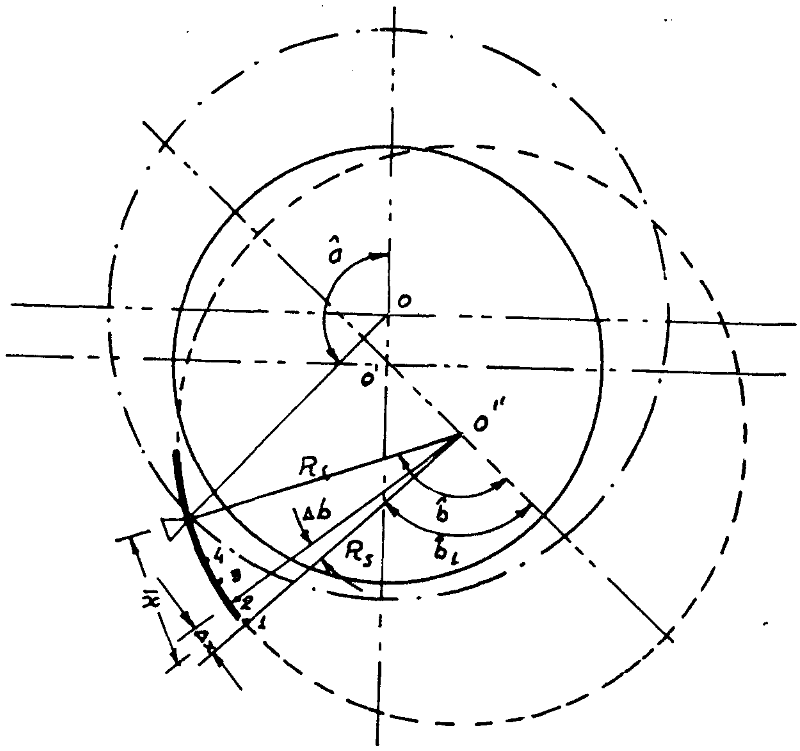


Fig. 21 - Aplicação da rede de diferenças a uma sapata de mancal radial.

De acordo com a Fig.21, pode-se escrever

$$\Delta\hat{b} = \Delta x/Rs$$

e

$$\hat{b}1 = \hat{b} - \overline{x}/Rs - \Delta b/2$$

ou seja

$$\hat{b}1 = \hat{b} - (2\,\overline{x} + \Delta x)/2Rs$$

Assim, a exoressão (3.11) torna-se

$$h(j) = C+e.\cos(\hat{b} - (\overline{x} - (j-0.5)\Delta x)/Rs) \qquad (3.12)$$

CAPÍTULO IV

SIMULAÇÃO DE MANCAIS HIDRODINÂMICOS

4 . 1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo é feita uma descrição detalhada do programa desenvolvido, explicando os passos mais importantes do programa principal e de cada subrotina separadamente, de forma que os interessados em lubrificação hidrodinâmica possam acompanhar, facilmente, a listagem apresentada no apêndice 1 deste trabalho. O programa em questão é, praticamente, uma simulação de mancais hidrodinâmicos pois o usuário estabelece, através de um ante-projeto um conjunto de dimensões e condições iniciais para introdução no programa obtendo deste uma configuração geométrica e física para analisar e decidir quanto à sua aplicação. Os processos de simulação para mancais radiais e axiais são apresentados a seguir.

4 . 2 - CONTROLE DO PROGRAMA

O programa está estruturado para receber do projetista dados sobre o lubrificante usado, dimensões do mancal e a altura mínima permitida para o filme lubrificante. Esta altura míni ma fica nas sapatas mais carregadas, Fig.25.. O programa responde com a carga máxima que o mancal pode suportar com esta limitação, além de outros valores como a temperatura máxima do óleo, temperatura média, viscosidade média, vazão de óleo, potência consumida em atrito, coordenadas do centro de pressões e, no caso de mancais radiais, a excentricidade do eixo. Se a carga é maior ou menor do que a carga desejada, o projetista poderá fazer alterações nas dimensões ou nas condições de utilização como temperatura inicial do óleo, rotação ou mesmo na altura mínima. O número de sapatas deverá ser par e distribuídas simetricamente em relação è linha de carga, como na Fig.19. Este tipo de carregamento é o que permite um número mínimo de sapatas (4 sapatas), enquanto outra disposição, como mostrada na Fig.22, deve ser usada para um grande número de sapatas [5].

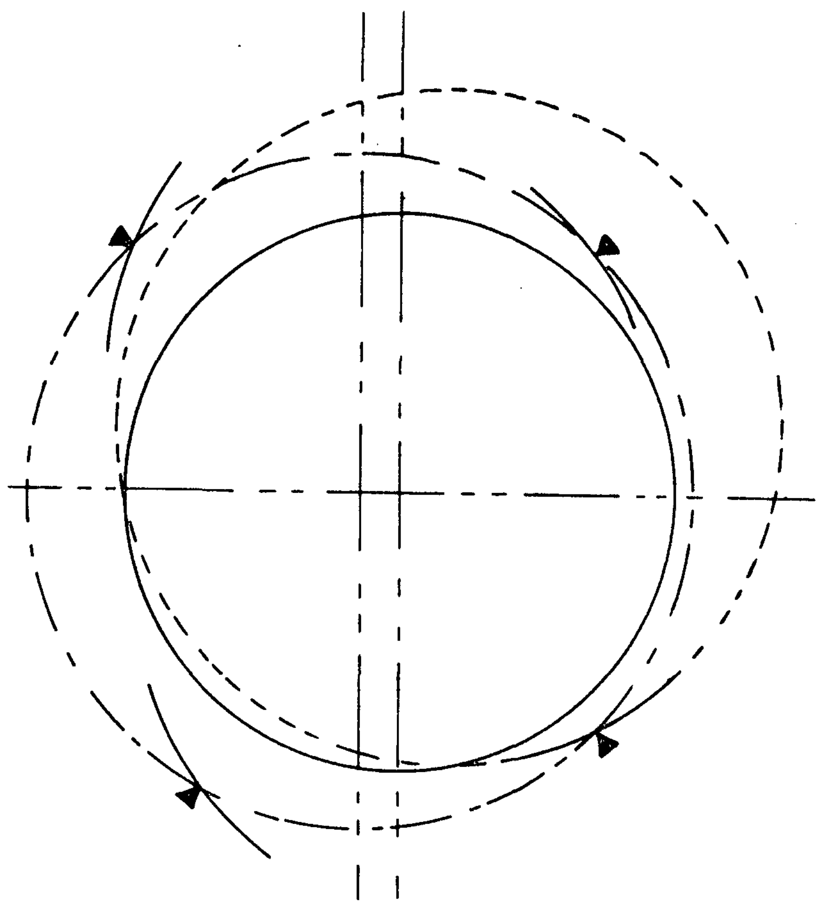


Fig. 22 - Disposição inadequada para um mancal radial de sapatas pivotadas

Para a entrada de diversas situações e apresentação de diversas formas de resultados foram tiradas cinco balisas para o controle do programa, sendo uma indireta e quatro diretas. A baliza indireta informa ao programa se o mancal deve ser radial ou axial e está embutida nos nomes (NAME LIST) dos dados conforme as Figuras 23 e 24.

```
$CHAVES CHAVE1=X,CHAVE2=Y,CHAVE3=Z,CHAVE4=T,$
$AXIAL Ri=XX,R2=XY,H1=XZ,DECLIV=XT,ARC=XU,H2=Ø,$
$DADOS4 N=YX,M=YY,FATOR=YT,LIMITE=YU,EPSILO=YW.NUMERO=YZ,$
$DADOS3 MASSA=TX,CALORE=TY,ROTACA=TT,PIVOT,$
$DADOS2 VISKI1=UX, VISK=2UY, VISK3=UU,$
$DADOS1 TEM1=ZX,TEMP2=ZY,TEMP3=ZT,$
```

Fig.23 - "DECK" de dados para um mancal axial.

```
$CHAVES ............................$
$RADIAL B=X,L=Y,H1=Z,DEIXO=T,RSAPTAT=U,$
$AXIAL NULO                        $
$DADOS4............................$
$DADOS3 ..........................$
$DADOS 2 ......................$
$DADOS1 .......................$
```

Fig. 24 - "DECK" de dados para um mancal radial.

Os cartões com DADOS1 até DADOS4 são comuns aos dois tipos de mancal, sendo que, após sua leitura, o próximo cartão deve ter a denominação AXIAL com suas respectivas variáveis para que o programa considere estes dados como dados de um mancal axial. Ao colocar um "deck" de dados para mancal radial, o programa tentará fazer a leitura como um mancal axial encontrando no cartão AXIAL, como primeira variável, a expressão NULO (ou qualquer nome diferente de R1) como mostrado na Fig.24. Isto, para a declaração NAMELIST, constitui uma condição de erro e assim a declaração

```
READ ( 3, AXIAL, ERR= 1 )
```

transfere o controle do programa para declaração

```
1 READ ( 3, RADIAL )
```

assumindo então que todos os valores já lidos e os subsequentes se referem a um mancal radial.

As demais balizas chamadas CHAVE1, CHAVE2, CHAVE3 e CHAVE4 têm as seguintes funções :

CHAVE1 - Indica qual a fórmula de altura do filme, armazenada na subrotina altura, que será usada (forma de sapata).

CHAVE2 - Indica o tipo de vinculação da sapata ao mancal (Fixa, pivô dado ou otimizado).

CHAVE3 e 4 - Controlam a impressão dos resultados.

A tabela 2 indica os valores e funções de cada chave.

TABELA 1 - FUNÇÕES DAS CHAVES DE CONTROLE DO PROGRAMA

Nº CHAVE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CHAVE 1	Fórmula (3,1) Mancal Axial	Fórmula (3.4) Mancal Axial	Fórmula (3.11)	Fórmula (3.12)	Alturas dadas u-ma a uma	Espaço para Fórmula 6	Espaço para Fórmula 7	Espaço para Fórmula 8	Espaço para Fórmu-la 9	Espaço para Formula 10
CHAVE 2	Pivô otimizado	Pivô dado	Sapata Fixa	-	-	-	-	-	-	-
CHAVE 3	-	-	-	Imprime os resultados de todas as sapatas e o total	Imprime o resultado da primeira e o total	-	-	-	-	-
CHAVE4	Não imprime pres-são .Temp. Viscosidade	Imprime pressão temperat. Viscosidade da la. sapata	Imprime pressão temperat. viscosid. de todas as sapatas	-	-	-	-	-	-	-

4 . 3 - CÁLCULO DE UMA SAPATA

Como já dissemos no capítulo 2, as equações de Reynolds e da energia devem ser resolvidas simultaneamente e, para uma sapata, uma vez que se tenha estabelecida a sua posição e inclinação em relação ao eixo, o campo de pressões sobre sua área será calculado de acordo com os seguintes passos:

1. Determinação dos valores das alturas em cada ponto (i,j) da malha.

2. P (i,j) é assumido igual a zero e T (i,j) é posto igual à temperatura inicial do óleo.

3. Com os valores T (i,j) são calculadas as viscosidades μ(i,j).

4. Tendo os valores de r (i,j), h (i,j) e μ(i,j), é feita uma primeira aproximação do campo de pressões com a expressão (2.11) ou (2.13) e melhorada por iteração.

5. Com este campo de pressões é calculada uma nova distribuição de temperaturas que é usada para calcular um novo conjunto de μ(i,j).

6. Uma segunda iteração do campo de pressões é feita e este ciclo de iterações entre pressão, temperatura e viscosidade continua até que a diferença entre os valores sucessivos do campo de pressões seja menor do que um valor pré-fixado, de acordo com a expressão (2.17).

Com as distribuições de pressão e temperatura pode-se, então, calcular a força na sapata, fluxos de lubrificante e perda de potência.

4 . 4 - O MANCAL RADIAL

O cálculo de um mancal axial se reduz ao cálculo de uma sapata, sendo o seu resultado multiplicado pelo número total de sapatas. No caso de mancais radiais a situação é bem diferente, com sapatas inclinadas diferentemente, gerando forças em diversas situações, Fig.25. Neste tipo de mancal, duas sapatas assumem uma importância consideravelmente maior do que as outras. São as sapatas nº 1 e nº 8 da Fig. 25. Nelas estão concentradas todos os valores críticos do mancal, como a máxima pressão, a força máxima sobre o pivô, a máxima temperatura e a mínima altura do filme.

O mancal poderá ser de pivô dado ou pivô otimizado, tendo sido para isto introduzidas duas subrotinas denominadas CENTRO E FORÇA para os primeiro e segundo casos, respectivamente. A diferença básica destas subrotinas é o tipo de parâmetros que elas controlam; a declividade de sapata é incrementada- partindo do paralelismo-se o centro de pressão não está coincidindo com o pivô dado ou se a força resultante não é máxima. No caso específico de mancal radial a noção de declividade não tem sentido, sendo substituída por excentricidade (neste caso, execentricidade do eixo em relação à curvatura da sapata). No entanto, para que possam ser usadas as mesmas subrotinas nos mancais radiais ou axiais a palavra declividade é usada no lugar de excentricidade.

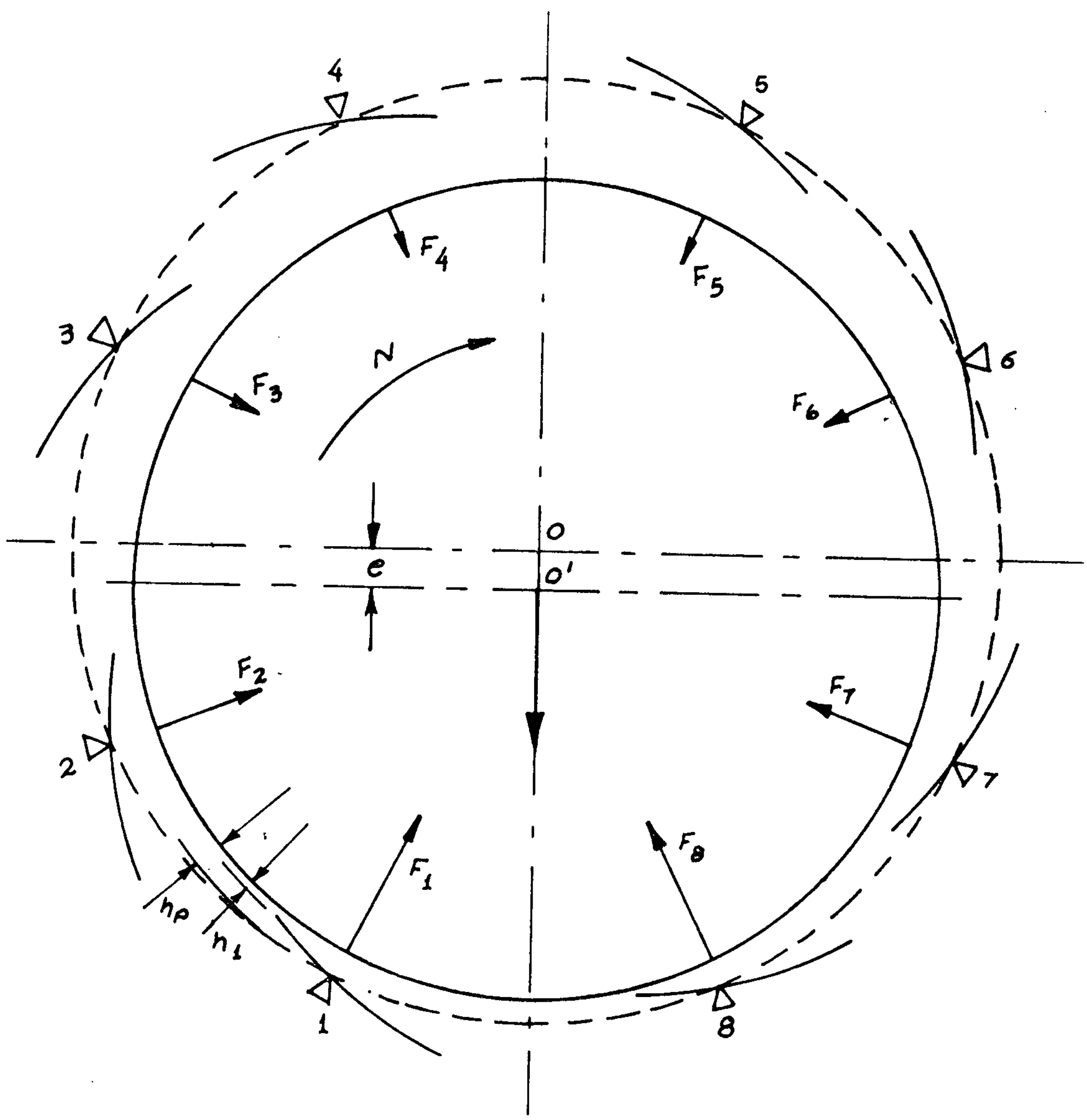


Fig. 25 - Diagrama de forças para um mancal radial.

4 . 5 - PROGRAMA PRINCIPAL

O cálculo da sapata mais carregada é feito de acordo com a sequência da Fig.26. A excentricidade do eixo relativamente ao círculo de pivôs, é aumentada progressivamente a intervalos constantes, mantendo-se fixa a altura mínima; a cada etapa é verificado se a força é máxima, no caso de pivô otimizado, ou se a resultante do campo de pressões coincide com o pivô dado ; quando este valor é ultrapassado, o eixo volta à sua posição anterior, o intervalo é biseccionado e o processo continua até que o intervalo seja menor do que um valor prefixado. Quando a sapata é de pivô dado, ou seja, a posição do pivô com relação à sapata é conhecida, o processo ocorre exatamente como a sequência da Fig.26. No caso da sapata otimizada, onde $\bar{x}$ varia entre 0,55 B e 0,70 B, a sapata é colocada inicialmente com $\bar{x}$ = 0,75B .

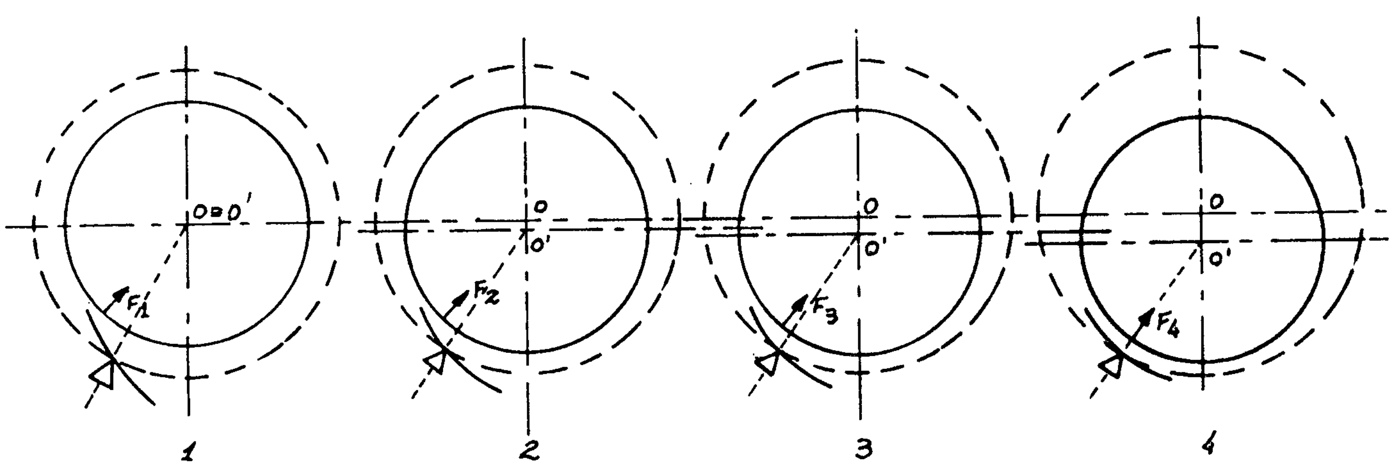


Fig. 26 - Determinação da posição da sapata mais carregada.

Após o cálculo do campo de pressões, é calculada a força resultante e o centro de pressões. Este, provavelmente, não coincidirá com a posição estabelecida a priori, $\bar{x} = 0,75B$, sendo, então, necessário que a sapata seja deslocada para a posição de coincidência do centro de pressões com o pivô. Assim, além de ser verificada em cada etapa se a força é máxima, a posição do pivô em relação à sapata, ou mais precisamente, a posição da sapata em relação ao pivô deve ser atualizada.

Note-se pela Fig.26 que, para cada posição do eixo, pode-se calcular a altura sobre o pivô, hp, sendo já conhecida a altura mínima hl. Assim, conhecidos dois valores da altura, o cálculo dos demais valores deve ser feito de acordo com o processo A descrito no item 3-3, pelas fórmulas (3.9) e (3.12).

Quando a primeira sapata estiver " pronta " o eixo estará na sua posição de trabalho, e com isto pode-se determinar as alturas dos demais pivôs com relação ao eixo, para o calculo das outras sapatas. Agora, com o valor de $\bar{x}$ dado ou determinado no cálculo da primeira sapata, pode-se controlar a inclinação das outras de acordo com o processo B do item 3-3 com as fórmulas (3.10) e (3.12), até que as resultantes dos campos de pressão tenham suas linhas de ação passando pelos respectivos pivôs. Após o cálculo de cada sapata, os resultados tais como potência, fluxo de óleo e a componente da força na direção da carga, são acumulados para a apresentação final na subrotina FP.

As etapas do programa principal são:

E.1 - Leitura dos dados. Se a sapata for otimizada, o pivô é iniciado com PIVO=3xB /4, para mancal radial ou PIVOT= 3xARC/4, para mancal axial. ARC é o ângulo subtendido pela sapata.

E.2 - Impressão dos dados.

E.3 - Iniciação e cálculo de valores específicos para cada tipo de mancal. Exemplo : Δr e $\Delta\theta$ para mancais axiais, ou Δz e Δx para mancais radiais.

E.4 - Cálculo dos coeficientes da fórmula de viscosidade.

E.5 - Cálculo das alturas em cada ponto (i,j) de malha, de acordo com a fórmula indicada na Chave 1. Se for a primeira sapata de um mancal radial o cálculo será feito de acordo com o esquema a) do item (3.3). As demais sapatas são calculadas pelo esquema b).

E.6 - Colocação das condições iniciais. As condições de contorno são colocadas na subrotina PRESSÃO.

E.7 - Cálculo das pressões, temperaturas e viscosidades em cada ponto (i, j) da malha.

E.8 - Cálculo da força resultante e das coordenadas do centro de pressões.

E.9 - Verificar se a força resultante é máxima, ou se $\bar{x}$ coincide com o pivô dado. Em qualquer caso, se a verificação for negativa, incrementar a declividade ou excentricidade voltando à etapa E.5. Em caso afirmativo, passar à etapa seguinte.

E.10 - Impressão dos resultados da sapata. Esta impressão é opcional se não for a primeira sapata. Tendo-se concluído a primeira sapata, no caso desta ser otimizada, a posição do pivô estará determinada por esta condição. Assim, as demais serão consideradas de pivô dado. Se o mancal for axial, onde todas as sapatas são iguais, o programa para, após a impressão.

E.11 - Para mancais radiais, acumula-se a componente da força na direção da carga, perda de potência e fluxo de óleo.

E.12 - Verificar se foram calculadas todas as sapatas. Em caso negativo, iniciar a sapata seguinte voltando à etapa E.5.

4 . 6 - SUBROTINAS

4 . 6 . 1 - A Subrotina Pressão

Esta subrotina, a principal do programa, calcula as pressões, temperaturas e viscosidades em cada ponto (i,j) da malha e, em resumo, funciona da seguinte maneira:

Inicialmente são calculados os valores das temperaturas e viscosidades, partindo de um campo de pressões nulo. Com estes valores é iniciada a iteração das pressões até que a variação global dos pontos seja menor do que um certo epsilon especificado ou até que o número de iterações atinja um limite prefixado pelo usuário. Neste ponto, as temperaturas são novamente calculadas e iniciada uma nova iteração. Este processo continua até que um último cálculo das temperaturas não produza uma variação sensível no campo de pressões. Um resultado típico que pode ser observado neste cálculo é o seguinte:

Para LIMITE = 3Ø, EPSILON = Ø.ØØ1 e CONVG (k) dado pela expressão (2.17).

1º CONVG (3Ø) = Ø.3642Ø

2º CONVG (3Ø) = Ø.Ø582Ø

3º CONVG (22) = Ø.ØØØ85

4º CONVG (6) = Ø.ØØØ98

5º CONVG (1) = Ø.ØØØ9Ø

significando que nos primeiro e segundo cálculos das temperaturas não se conseguiu obter a convergência desejada em trinta iterações. No terceiro cálculo foi atingido o limite de convergência mas, as temperaturas estão defasadas de 22 iterações em relação às pressões. No 5º cálculo a variação global das pressões já atinge o valor desejado na primeira iteração finalizando a subrotina. Assim, o controle deve retornar ao programa principal quando CONVG (k) for menor do que epsilon e quando K for igual a 1.

Neste exemplo as temperaturas foram calculadas 5 vezes a este número é suficiente para se encontrar a convergência desejada. Entretanto, para prevenir algum engano por parte do usuário, um contador, KK, limita em trinta estes cálculos.

ETAPAS DA SUBROTINA PRESSÃO

E.1 - Iniciação dos contadores. k=∅ ; KK=∅.
O contador do número de iterações da pressão pode, nesta primeira etapa, ser iniciado com qualquer valor diferente de 1, apenas para passar pela primeira vez, no teste da etapa E.2.

E.2 - KK=KK+1. Cálculo das temperaturas e viscosidades.
Se K =1 ou KK=3∅, o controle retorna ao programa principal. Se não, iniciar novamente o contador K (K=∅).

E.3 - K=K+1.

Realizar as iterações do campo de pressões e calcular o índice convergência (CONVG (K)).

E.4 - Se K é igual ao LIMITE ou o índice de convergência é menor do que EPSILON, voltar à etapa E.2. Se não voltar à etapa E.3.

4 . 6 . 2 - Subrotina Altura

Esta subrtina contém diversas fórmulas para o cálculo das alturas em cada ponto pivotal da malha de diferenças finitas estabelecida sobre a sapata. As fórmulas estão dispostas de forma que o usuário do programa precisa apenas indicar o número de pontos desejados dentro da área da sapata, na forma MxN, sendo os pontos externos, extrapolados pela própria subrotina. As fórmulas armazenadas estão indicadas na tabela 2 e são alcançadas através da CHAVE 1. Para atender a casos especiais, os valores destas alturas podem ser dados um a um pelo usuário através do terminal ou de conjunto de cartões colocados imediatamente depois do "Deck" de dados. O formato para este tipo de entrada de dados está explicado no manual do usuário do apêndice 1.

4 . 6 . 3 - Subrotina FForça

Esta subrotina verifica se a força calculada no programa principal atingiu o seu máximo (comparando o seu valor atual com o valor anterior). Se o valor atual é maior do que o valor anterior, a declividade é incrementada de AA=1.ØE-3, para mancais axiais e de AA=1.ØE-2 para mancais radiais. Se é menor, a declividade retorna à sua penúltima posição (DECLIVE = DECLIVE = 2.AA) o intervalo é biseccionado (AA = AA/2) e a declividade é novamente incrementada. A declividade retorna duas posições anteriores porque, quando a força atual for menor do que a força anterior, o máximo pode ter ficado duas posições antes, como se pode notar na Fig.27, onde a numeração indica a ordem dos cálculos. Por este gráfico, embora F_4 seja maior do que F_3 a curva já está na sua parte descendente. Isto só vai ser notado pela subrotina FFORÇA após o cálculo de F_5, quando então a declividade volta à posição $D_6 = D_3$, reiniciando o ciclo.

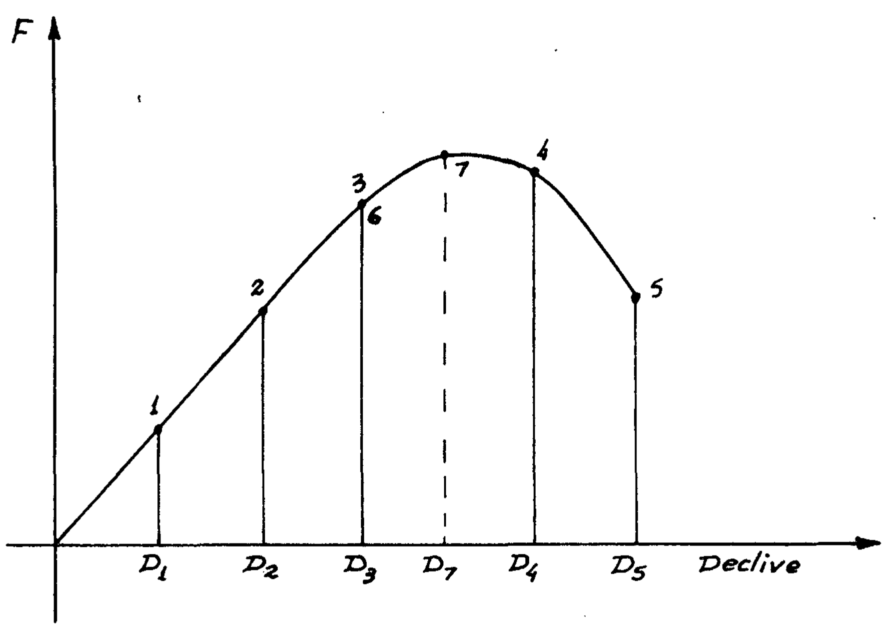


Fig. 27 - Evolução da força com relação à declividade

PASSOS

E.1 - Comparar a força atual com a força anterior . Se a força atual for maior, seguir para a etapa E.5. Na primeira chamada da subrotina a força atual é maior do que a força anterior porque esta é iniciada com zero.

E.2 - Retroceder em dois passos o valor da declividade. Zerar a força anterior (FORSA = Ø).

E.3 - Se o incremento de declividade é insignificante, retornar o controle ao programa principal na instrução imediatamente após a declaração de chamada da subrotina.

E.4 - Dividir o incremento da declividade por 2 e seguir para a etapa E.6.

E.5 - Força anterior = força atual. Para uso na próxima chamada da subrotina.

E.6 - Incrementar o declive e retornar ao programa principal na parte de colocação das condições iniciais.

4 . 6 . 4 - Subrotina Centro

Esta subrotina é semelhante à subrotina FFORÇA, sendo o controle realizado sobre $\overline{x}$ e a sapata é considerada calculada quando o centro de pressões está localizado sobre o pivô dado, ou calculado pela subrotina FFORÇA.

4 . 6 . 5 - Subrotina FP (FLUXO - POTÊNCIA)

FP calcula o fluxo em cada aresta da sapata, a potência perdida e a temperatura média. Além disto FP seleciona , também, a temperatura máxima dentro de cada sapata.

Um fluxograma detalhado, assim como a listagem completa do programa pode ser encontrado no Apêndice I.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

5 . 1 - INTRODUÇÃO

As simplificações utilizadas na dedução da equação de Reynolds e da Energia, assim como a utilização de métodos numéricos para resolvê-las, vão produzir erros nos resultados. A ordem de grandeza destes erros, devido ao grau de complexidade das equações só poderá ser obtida pela comparação dos resultados obtidos com resultados de experiência prática. Entretanto, estes resultados são muito escassos e, na bibliografia consultada para a realização deste trabalho, apenas podem ser encontrados na referência [9], mesmo assim, exclusivamente para sapatas de mancal axial com perfil senoidal. Um desenho deste tipo de sapata está apresentado na Fig.13. Desta forma, para a verificação do programa proposto dispoẽ-se apenas de resultados obtidos pelo mesmo método, ou por gráficos e tabelas.

5 . 2 - PERFIS DE PRESSÕES E TEMPERATURAS

O campo de pressão, obtido com o programa, para uma sapata de mancal axial, tem a forma mostrada na Fig. 28.

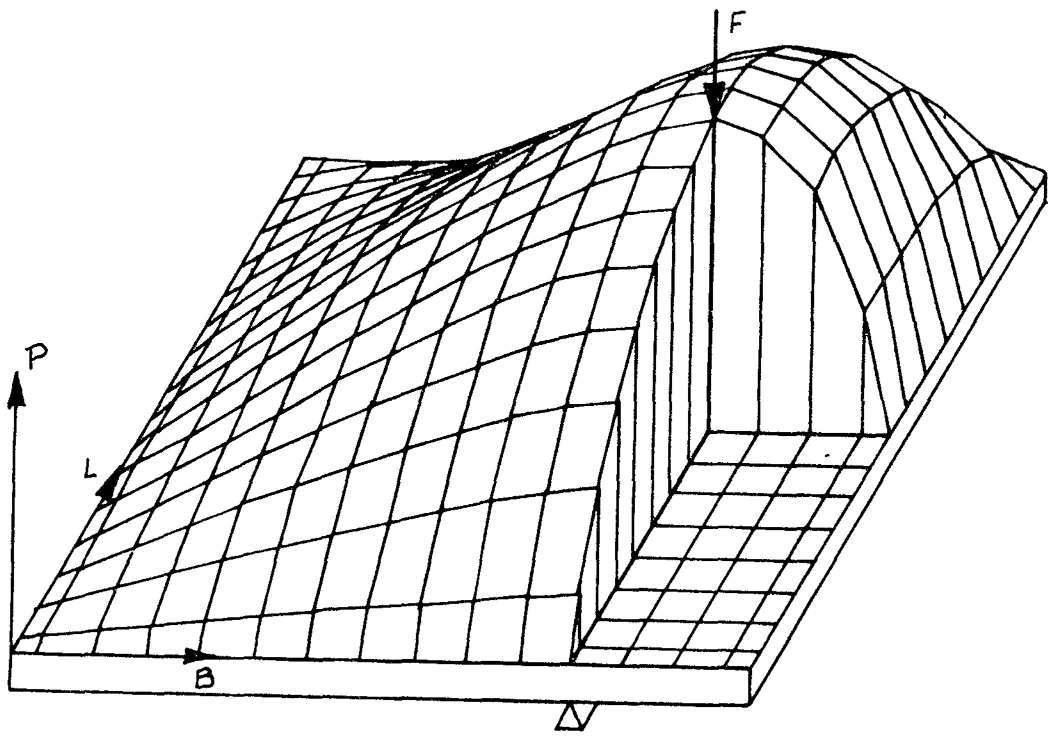


Fig. 28 - Campo de pressões sobre uma sapata de mancal axial.

Cortes em diversas seções são comparados com resultados obtidos por Sternlicht [8], utilizando o mesmo processo de cálculo, na Fig.29. Embora utilizando os mesmos dados de Sternlicht, que são

$$R_1 = \frac{1''}{2} \qquad\qquad R_2 = 31''$$

$h_{m/n} = 0{,}001"$ $\qquad\theta_t = 0{,}667$ rad

$n = 5{,}33$ rps $\qquad T_1 = 130°$ F,

os valores da pressão não devem ser observados rigorosamente, porque os dados sobre o lubrificante, por ele utilizados, não puderam ser encontrados tendo sido usado no programa um óleo de características diferentes (ASTM 150).

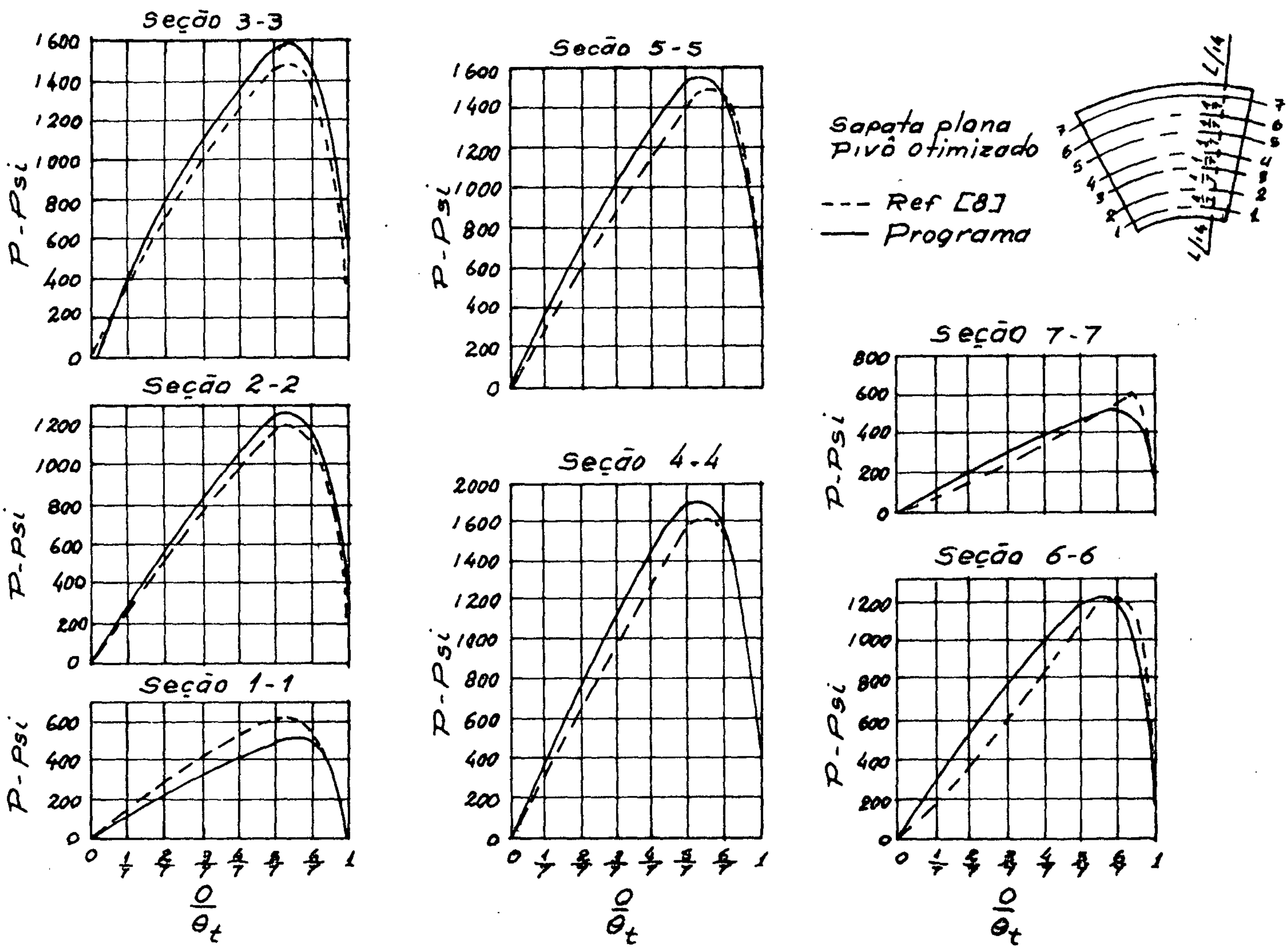


Fig. 29 - Comparação da pressão - quanto à forma - com resultados da ref. [8]

Os perfis de temperaturas são comparados na Fig.30. Note-se que, por ter sido considerado, na dedução da equação da energia, que todo o calor gerado no processo seria armazenado no óleo, o perfil de temperatura se apresenta de forma crescente da aresta de entrada até a aresta da saída. Na prática, medições indicam que, devido à transmissão de calor, do fluido para a sapata e para o eixo, a temperatura atinge o máximo dentro da área da sapata, a pouca distância da aresta de saída [8].

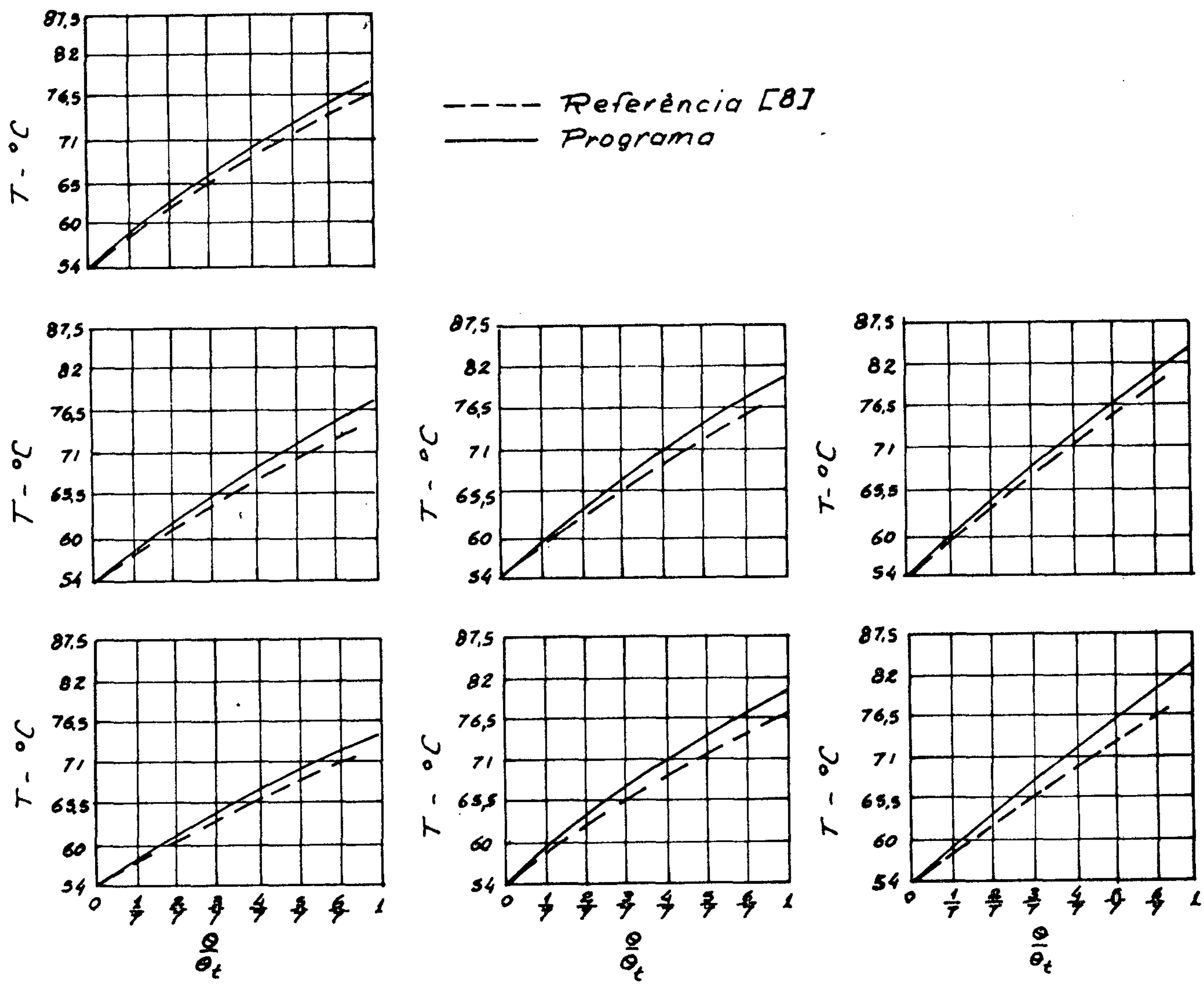


Fig. 30 - Perfis de temperatura comparados com resultado da ref. [8].

5 . 3 - SAPATAS PIVOTADAS

Raimondi e Kaufman [5] apresentam gráficos para o cálculo de sapatas finitas, que são muito conhecidos e utilizados pelos projetistas de mancais. No entanto, estes gráficos foram obtidos com a condição de viscosidade constante para cada condição de uso da sapata. Esta condição tem seus efeitos bastante minorados pela consideração do valor da viscosidade na temperatura média do óleo. Entretanto, esta hipótese implica que, quando $\bar{x}/B$ tende para 0,5 (pivô centrado na sapata), $h_1/(B\ \mu UL/F)$ tende para 0 (Zero), Fig.31, implicando em força nula, (F=0) para B, U, L , H e μ dados.

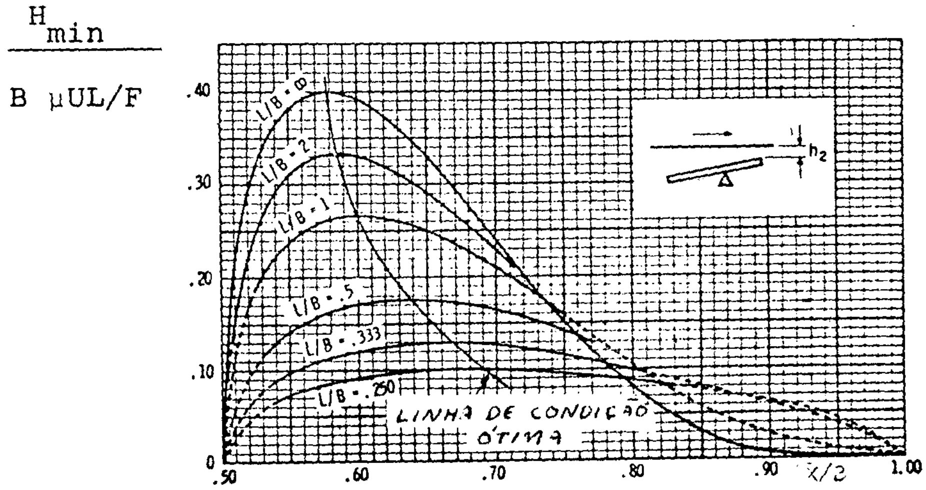


Fig. 31 - Gráfico para a determinação de h_{min} [5].

A tentativa de reprodução deste gráfico com o programa resultou no gráfico da Fig. 33, onde foi reproduzida a Fig. 31 com os resultados do programa sobrepostos. Por estes resultados vê-se que é possível o uso de sapatas com pivô centrado ($\bar{x}/B=0,5$), principalmente para L/B>1, o que permitiria a reversibilidade de rotação do eixo. Pode-se verificar por este gráfico que, para $\bar{x}/B<0,57$ a diferença encontrada deve ser atribuída à variação da viscosidade com a temperatura. A concordância dos resultados para $\bar{x}/B>0,57$, pode ser explicada pelo gráfico da Fig.32, obtido também por Raimondi e Kaufman [5], onde se nota que para $\bar{x}/B$ tendendo para 0,8 , que é a amplitude máxima do gráfico da Fig. 33, a elevação de temperatura se reduz a níveis mínimos, o que implica que a viscosidade tende a ficar constante.

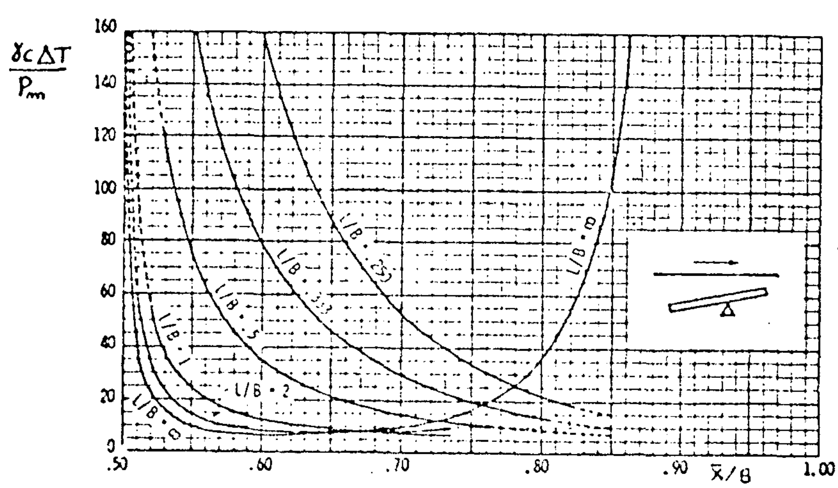


Fig. 32 - Gráfico para a determinação da elevação de temperatura [5].

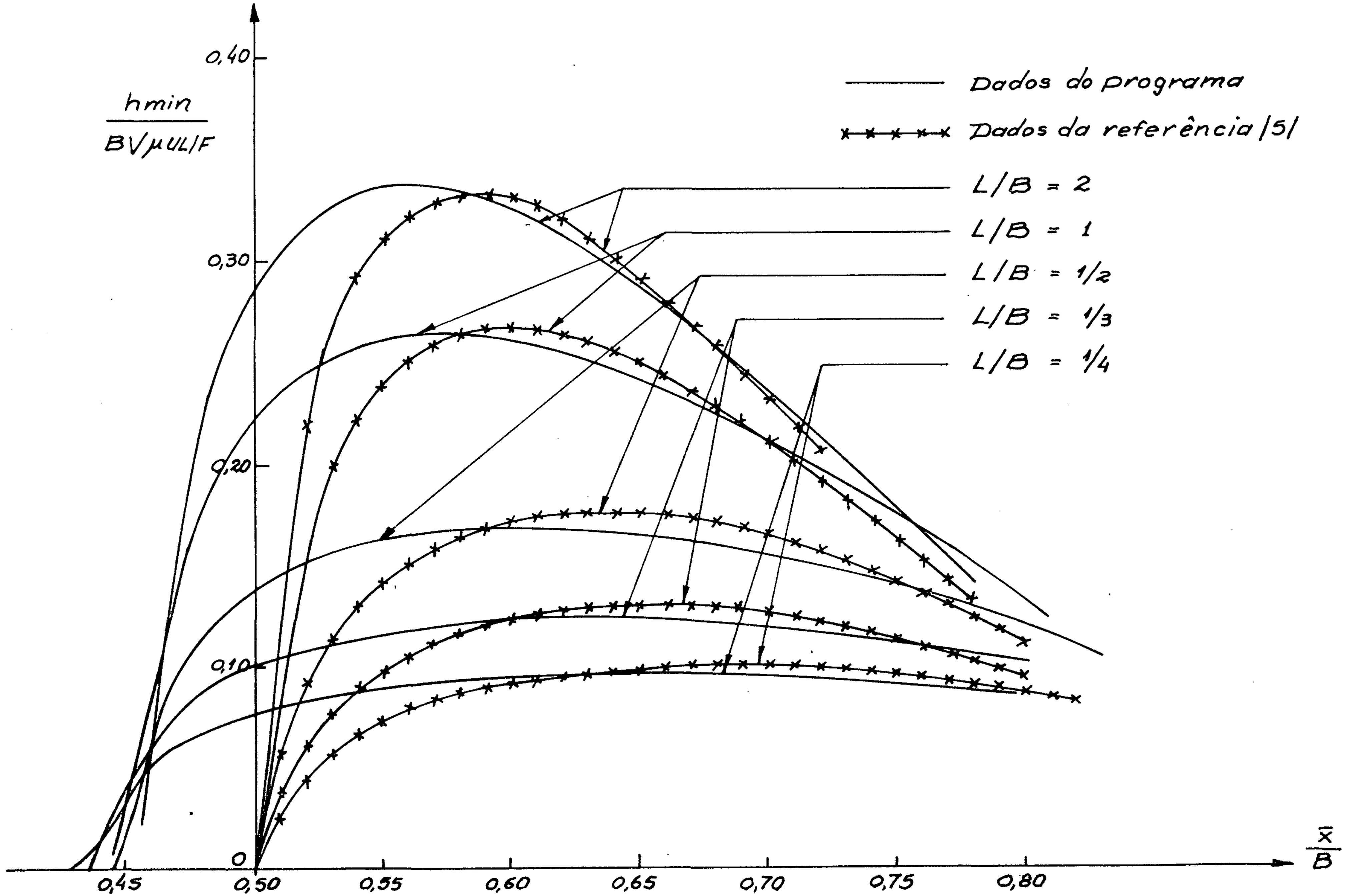


Fig. 33 - Gráfico para determinação de h_{min}-viscosidade variável —×—viscosidade constante

5 . 4 - MANCAL RADIAL COMPLETO DE SAPATAS PIVOTADAS

O teste do mancal radial completo foi feito baseado em um exemplo da referência [5], pág. . Todos os resultados deste exemplo, assim como os seus dados, estão relacionados na tabela 3 e comparados com os resultados do programa. Os 8 (oito) primeiros itens da tabela foram tomados iguais aos do exemplo por estarem incluídos entre os dados do programa. Os demais itens (9 a 15) são resultados de cálculo. As diferenças entre estes resultados e os valores do exemplo da referência |5|, estão relacionados, em forma percentual, no centro da tabela. No item 9 tem-se a viscosidade média, 5,15%, maior do que a viscosidade média do exemplo e no item 10, a temperatura média 1,45% menor que a temperatura média do exemplo. Os demais itens respondem, naturalmente, a uma viscosidade maior com uma excentricidade menor, uma elevação de temperatura maior e uma carga total maior. As diferenças percentuais é que precisam ser verificadas através de experiências práticas.

O relatório final do computador para este exemplo é apresentado a seguir e pode-se observar, pela ordem, os dados de entrada, os resultados da primeira sapata, os resultados da segunda sapata e os resultados totais do mancal. Os resultados totais representam o somatório das componentes das forças de todas as sapatas na direção da carga; a soma das perdas de potência de cada sapata; a soma dos fluxos de óleo necessários a cada sapata, que representa a capacidade mínima que deve ter o sistema de bombeamento e a excentricidade do eixo, que ocorre na mesma direção da carga.

Tab. 3 - Comparação dos resultados do computador com exemplo da referência (5)

	COMPUTADOR	RELAÇÃO	EXEMPLO DA REFERÊNCIA (5)	
			UNIDADES ORIGINAIS	CONVERTIDO PA S.I.
1	DEIXO = 2R = 0,254 m	=	R = 5 pol.	DEIXO = 0,254 m
2	L = 0,254 m	=	L = 10 pol.	L = 0,254 m
3	B = 0,1524 m	=	B = 6,0 pol.	B = 0,1524 m
4	ROTAÇÃO = 60 rps	=	ROTAÇÃO = 60 rps	
5	Nº de sapatas = 4	=	Nº de sapatas = 4	
6	FOLGA = $0,127\times10^{-3}$ m	=	C = $0,5 \times 10^{-3}$ pol.	C = $0,127\times10^{-3}$ m
7	X/B = 0,589	=	X/B = 0,589	
8	$H_{min} = 0,4826\times10^{-4}$ m	=	$H_{min} = 0,19\times10^{-2}$ pol	$h_{min} = 0,4826 \times10^{-4}$ m
9	μ = 0,0145 Pa.s (média)	> 5,15%	$\mu = 2\times10^{-6}$ Reyns	μ = 0,01379 Pa.s
10	T = 64,61 º C	< 1,45%	T = 150 ºF	T = 65,56 º C
11	EXCENTRICIDADE = $0,50378\times10^{-4}$ m	> 34,97%	e = $0,309\times10^{-2}$ pol.	e= $0,7747 \times 10^{-4}$ m
12	e/C = 0,39668	< 34,98%	e/C = 0,61	
13	ΔT_{max} = 28,462 ºC	> 7,86%	ΔT_{max} = 47,5 º F	ΔT_{max} = 26,389 $C
14	CARGA TOTAL F = 272675N	> 35,81%	F = 45 000 lbf	F = 200 0 34,23 N
15	CARGA NA SAPATA MAIS CARREGADA F1 = 198685 N	>17,622%	F1 = 38 000 lbf	F1 = 168917,798 N

```
$RADIAL
 H= 0.1524000    , L= 0.2540000    , H1= 0.4826000E-04, DEIXO= 0.2540000    , RSAPAT= 0.1271270    , $
$DADOS1
 TEMP1=   50.00000    , TEMP2=   10.00000    , TEMP3=   80.00000    , $
$DADOS2
 VISK1= 0.2500000E-01, VISK2= 0.2420000    , VISK3= 0.9000000E-02, $
$DADOS3
 MASSA=   90.00000    , CALORE=   2000.000    , ROTACA=   60.00000    , PIVOT= 0.8976360E-01, $
$DADOS4
 N=            16, M=              14, FATOR= 0.2000000    , LIMITE=            25, EPSILO= 0.1000000E-02, NUMERC=
    4,
$
$CHAVES
 CHAVE1=   3.000000    , CHAVE2=   2.000000    , CHAVE3=   4.000000    , CHAVE4=   1.000000    , $
  BETA=   864.492      TETA=     95.032      CONSTANTE=   0.00006

               ESTES RESULTADOS SE REFEREM A SAPATA MAIS CARREGADA  DO MANCAL RADIAL
                           CONFORME DADOS ACIMA E COM
                                PIVOT CENTRADO
                            FORCA NA  SAPATA = 198692.4600NEWTONS

                       COORDENADAS  DO  ** XBARRA = .0897602150METROS

                     CENTRO DE PRESSOES ** ZBARRA =  0.13596054METROS

                     POTENCIA CONSUMIDA EM ATRITO =      9.4257WATTS

           FLUXO DE LUBRIFICANTE ENTRANDO POR SAPATA =-.387252E-01M3/SEG

                                   FLUXO LATERAL = .158040E-01M3/SEG

                          FLUXO NA ALTURA MINIMA = .272268E-01M3/SEG

             ELEVACAO DE TEMPERATURA DO LUBRIFICANTE =   28.464968GRAUS CENTIGRADOS

                                TEMPERATURA MEDIA =   64.616893GRAUS CENTIGRADOS

                       VISCOSIDADE NA TEMPERATURA MEDIA =    0.014485PASCAL.SEG

                ESTES RESULTADOS SE REFEREM A SAPATA NUMERO  2 DO  MANCAL RADIAL
                            FORCA NA  SAPATA =   6000.4465NEWTONS

                       COORDENADAS  DO  ** XBARRA = .0894350750METROS

                     CENTRO DE PRESSOES ** ZBARRA =  0.13784843METROS

                     POTENCIA CONSUMIDA EM ATRITO =      5.6868WATTS

           FLUXO DE LUBRIFICANTE ENTRANDO POR SAPATA =-.623775E-01M3/SEG

                                   FLUXO LATERAL = .162475E-02M3/SEG

                          FLUXO NA ALTURA MINIMA = .612282E-01M3/SEG

             ELEVACAO DE TEMPERATURA DO LUBRIFICANTE =   10.806708GRAUS CENTIGRADOS

                                TEMPERATURA MEDIA =   55.514609GRAUS CENTIGRADOS
```

```
VISCOSIDADE NA TEMPERATURA MEDIA =    0.020096PASCAL.SEG

RESULTADOS TOTAIS CONSIDERANDO TAMBEM AS SAPATAS SIMETRICAS
                        FORCA TOTAL=-272507.6500NEWTONS

POTENCIA TOTAL CONSUMIDA EM ATRITO =     30.2250WATTS

          FLUXO ENTRANDO TOTAL =-.202205E+00M3/SEG

          EXCENTRICIDADE DO EIXO= .502042E-04 M

PROGRAMA REALIZADO SEM ERROS (DE ACORDO COM OS DADOS)
```

A título de comparação, foi tentada a otimização das sapatas do exemplo anterior, fazendo apenas $CHAVE_2$= 1, de acordo com a tabela 2 do Capítulo IV, obtendo o resultado da página A explicação para este resultado é que a sapata otimizada admite uma inclinação menor do que a sapata com pivô na posição $\overline{X}$ =0,0897m do exemplo anterior, proporcionado uma excentricidade maior do eixo e, consequentemente, uma folga exagerada nas sapatas superiores não permitindo a convergência. Diminuindo a folga através da redução do raio da sapata que passou de 0,127127 para 0,12708 m, foi obtido o resultado da página . Neste caso, devido a folga ser muito pequena, a posição inicial da sapata já esta menos inclinada do que a posição ótima não permitindo a otimização. O programa escreve a mensagem

FOLGA INSUFICIENTE PARA A OTIMIZAÇÃO DA SAPATA

quando verifica ao calcular pela segunda vez a força, que esta não está aumentando.

Em outra tentativa tomou-se o raio da sapata igual a 0,127100 m, dois décimos de milimetro maior do que na última tentativa, obtendo-se então os resultados da página com continuação na página .

Assim, como se pode notar, o programa orienta o usuário indicando a razão da impossibilidade dele fornecer resultados positivos, sendo previstas ainda outras mensagens, tais como :

FOLGA INSUFICIENTE PARA ALCANÇAR O PIVÔ DADO;

PRESSÃO NÃO CONVERGE NO MANCAL AXIAL, PROVAVELMENTE

A ALTURA MÍNIMA ESTÁ MUITO GRANDE.

NÃO FOI ENCONTRADA NA SUBROTINA ALTURA A EXPRESSÃO CORRESPONDENTE AO NÚMERO DA CHAVE1, OU O NÚMERO É MAIOR QUE 10.

```
$RADIAL
 B= 0.1524000    , L= 0.2540000    , H1= 0.4826000E-04, DEIXO= 0.2540000    , RSAPAT= 0.1271270    , $
$DADOS1
 TEMP1=   50.00000    , TEMP2=   10.00000    , TEMP3=   80.00000    , $
$DADOS2
 VISK1= 0.2500000E-01, VISK2= 0.2420000    , VISK3= 0.9000000E-02, $
$DADOS3
 MASSA=   90.00000    , CALORE=   2000.000    , ROTACA=   60.00000    , PIVOT= 0.1143000    , $
$DADOS4
 N=          16, M=           14, PATCH= 0.2000000    , LIMITE=           25, EPSILO= 0.1000000E-02, NUMERC=
   4,
$
$CHAVES
 CHAVE1=   3.000000    , CHAVE2=   1.000000    , CHAVE3=   4.000000    , CHAVE4=   1.000000    , $
  BETA=   864.492      TETA=    95.032      CONSTANTE=   0.00006

              ESTES RESULTADOS SE REFEREM A SAPATA MAIS CARREGADA  DO MANCAL RADIAL
                                   CONFORME DADOS ACIMA E COM
                                      PIVOT OTIMIZADO
                                   FORCA NA  SAPATA = 209864.2100NEWTONS

                         COORDENADAS  OU  ** XBARRA = .0817065270METROS

                        CENTRO DE PRESSOES ** ZBARRA =  0.13627516METROS

                        POTENCIA CONSUMIDA EM ATRITO =      9.9852WATTS

           FLUXO DE LUBRIFICANTE ENTRANDO POR SAPATA =-.311592E-01M3/SEG

                                       FLUXO LATERAL = .940418E-02M3/SEG

                              FLUXO NA ALTURA MINIMA = .246416E-01M3/SEG

              ELEVACAO DE TEMPERATURA DO LUBRIFICANTE =   37.215688GRAUS CENTIGRADOS

                                   TEMPERATURA MEDIA =   69.059305GRAUS CENTIGRADOS

                             VISCOSIDADE NA TEMPERATURA MEDIA =    0.012510PASCAL.SEG

%FRSAPR FLOATING OVERFLOW       PC= 14323
%FRSAPR FLOATING OVERFLOW       PC= 14321
PRESSAO NAO ESTA' CONVERGINDO, PROVAVELMENTE A FOLGA ESTA MUITO GRANDE
```

```
$RADIAL
 B=  0.1524000    ,  L=  0.2540000    ,  HI=  0.4826000E-04,  DEIXO=  0.2540000    ,  RSAPAT=  0.1270800    , $
$DADOS1
 TEMP1=   50.00000    ,  TEMP2=   10.00000    ,  TEMP3=   80.00000    , $
$DADOS2
 VISK1=  0.2500000E-01,  VISK2=  0.2420000    ,  VISK3=  0.9000000E-02, $
$DADOS3
 MASSA=   90.00000    ,  CALORE=   2000.000    ,  ROTACA=   60.00000    ,  PIVOT=  0.1143000    , $
$DADOS4
 N=             16,  M=             14,  FATOR=  0.2000000    ,  LIMITE=              25,  EPSILO=  0.1000000E-02,  NUMERC=
     4,
$
$CHAVES
 CHAVE1=   3.000000    ,  CHAVE2=   1.000000    ,  CHAVE3=   4.000000    ,  CHAVE4=   1.000000    , $
  BETA=   864.492      TETA=    95.032      CONSTANTE=   0.00006

FOLGA INSUFICIENTE PARA A OTIMIZACAO DA SAPATA
```

```
$RADIAL
 B= 0.1524000    ,  L=  0.2540000    ,  H1=  0.4826000E-04,  DEIXO=  0.2540000    ,  RSAPAT=  0.1271000    , $
$DADOS1
 TEMP1=    50.00000    ,  TEMP2=    10.00000    ,  TEMP3=    80.00000    , $
$DADOS2
 VISK1=  0.2500000E-01,  VISK2=  0.2420000    ,  VISK3=  0.9000000E-02, $
$DADOS3
 MASSA=    90.00000    ,  CALORE=    2000.000    ,  ROTACA=    60.00000    ,  PIVOT=  0.1143000    , $
$DADOS4
 N=              16,  M=              14,  FATOR=  0.2000000    ,  LIMITE=              25,  EPSILO=  0.1000000E-02,  NUMERC=
    4,
$
$CHAVES
 CHAVE1=    3.000000    ,  CHAVE2=    1.000000    ,  CHAVE3=    4.000000    ,  CHAVE4=    1.000000    , $
  BETA=    864.492      TETA=    95.032      CONSTANTE=    0.00006

                    ESTES RESULTADOS SE REFEREM A SAPATA MAIS CARREGADA  DO MANCAL RADIAL
                                      CONFORME DADOS ACIMA E COM
                                           PIVOT OTIMIZADO
                                      FORCA NA  SAPATA = 203197.6800NEWTONS

                               COORDENADAS  DO  ** XBARRA = .0849279690METROS

                              CENTRO DE PRESSOES ** ZBARRA =  0.13637855METROS

                              POTENCIA CONSUMIDA EM ATRITO =      9.6202WATTS

                  FLUXO DE LUBRIFICANTE ENTRANDO POR SAPATA =-.334440E-01M3/SEG

                                           FLUXO LATERAL = .106103E-01M3/SEG

                                  FLUXO NA ALTURA MINIMA = .259019E-01M3/SEG

                   ELEVACAO DE TEMPERATURA DO LUBRIFICANTE =   33.777984GRAUS CENTIGRADOS

                                       TEMPERATURA MEDIA =   67.137408GRAUS CENTIGRADOS

                                  VISCOSIDADE NA TEMPERATURA MEDIA =    0.013316PASCAL.SEG

                     ESTES RESULTADOS SE REFEREM A SAPATA NUMERO  2 DO  MANCAL RADIAL
                                      FORCA NA  SAPATA =  10029.4710NEWTONS

                               COORDENADAS  DO  ** XBARRA = .0845574460METROS

                              CENTRO DE PRESSOES ** ZBARRA =  0.13786409METROS

                              POTENCIA CONSUMIDA EM ATRITO =      6.9825WATTS

                  FLUXO DE LUBRIFICANTE ENTRANDO POR SAPATA =-.462718E-01M3/SEG

                                           FLUXO LATERAL = .127023E-02M3/SEG

                                  FLUXO NA ALTURA MINIMA = .454236E-01M3/SEG

                   ELEVACAO DE TEMPERATURA DO LUBRIFICANTE =   17.865111GRAUS CENTIGRADOS

                                       TEMPERATURA MEDIA =   59.191743GRAUS CENTIGRADOS
```

```
          VISCOSIDADE NA TEMPERATURA MEDIA =     0.017525PASCAL.SEG

     RESULTADOS TOTAIS CONSIDERANDO TAMBEM AS SAPATAS SIMETRICAS
                              FORCA TOTAL=-273181.1000NEWTONS

       POTENCIA TOTAL CONSUMIDA EM ATRITO =      33.2053WATTS

                  FLUXO ENTRANDO TOTAL =-.159432E+00M3/SEG

                EXCENTRICIDADE DO EIXO= .286848E-04 M

PROGRAMA REALIZADO SEM ERROS (DE ACORDO COM OS DADOS)
```

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que o programa desenvolvido, na sua configuração atual (apêndice 1), representa uma ferramenta de grande capacidade para o projeto de mancais hidrodinâmicos, superando o processo de gráficos e tabelas em muitos aspectos, tais como :

1 - Consideração da variação de viscosidade com a temperatura- Esta é uma consideração muito importamente nos mancais hidrodinâmicos, principalmente quando estes são submetidos a grandes cargas e/ou têm pivôs muito perto dos centros das sapatas.

2 - Possibilidade de uso de qualquer forma de sapatas - é praticamente impossível a realização de gráficos para todos os tipos e dimensões de sapatas. Normalmente os gráficos são para sapatas planas retangulares com L/B = 2, 1 1/2, 1/3, 1/4. Alguns autores |2|, |6|, |7|, |11| apresentam, também, gráficos e tabelas para mancais radiais plenos ou parciais , sendo que o trabalho mais completo sobre este tipo de mancal é o de Raimondi e Boyd |7| que apresentam mais de 50 gráficos e tabelas num trabalho de 50 laudas.

3 - Rapidez e precisão - No cálculo do mancal radial de pivô dado, especificado na tabela 3 do Capítulo V, o tempo de CPU do computador DEC-1091 fabricado pela

Digital Corporation foi de 1 minuto, 26 segundos e 32 décimos, para u'a malha de 14x16 pontos. A título de comparação, Sternlicht | 1 | calculava uma sapata de mancal radial (7x7), em 1957, com 30 minutos de CPU. Atualmente, em um minuto, 26 segundos e trinta e dois décimos este processo é repetido vinte e nove vezes pois, no exemplo apresentado, a primeira sapata foi calculada dezoito vezes até a coincidência do centro de pressões com o pivô dado e onze vezes a segunda. A precisão maior vem do fato de que para o uso de tabelas tem-se, muitas vezes, que fazer interpolações e medições.

Entretanto, este programa está longe de ser considerado a palavra final em termos de projetos de mancais hidrodinâmicos e, como extensão para trabalhos futuros, podemos sugerir alguns pontos que devem ser considerados:

1 - Conjugação de um programa de elementos finitos para a determinação da deformação da sapata, simultaneamente com as equações de Reynolds e da energia perfazendo o ciclo temperatura - pressão - deformação.

2 - Inclusão da condução de calor na equação da energia.

3 - Modificação da equação de Reynolds para considerar a aplicação de carga dinâmica nos mancais.

4 - Estudo experimental meticuloso para a verificação prática dos resultados do programa.

Particularmente, pretendemos continuar este trabalho inicialmente com os pontos 1 e 4, nos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

BIBLIOGRAFIA

1 - STERNLICTH, B. & Maginnis, F.J.- Applacation of Digital Computers to Bearing Design - Transaction of the ASME- Outubro , 1957; Trabalho nº 56-A-73. Pag. 1483-1493.

2 - PINKUS, O. & Sternlicht, B.-Theory of Hidro dynamac Lubrication -McGraw-Hill, 1961.

3 - BACK, Nelson - Teoria da Lubrificação; Fundação do Ensino da Engenharia em Santa Catarina, 1975.

4 - DOWSON, D. - A Generalized Reynolds Equation for Fluid-Flim Lubrication - Int.J.Mech, Sei. Pergamon Press LTD. Vol.4.1962 Pag.159-176.

5 - O'CONNOR, J.J. & Boyd, J. (Editores) - Standar Handbook of Lubrication Enganeering - McGraw-Hill-1968

6 - CAMERON, A.- The Principles of Lubrication- Longmans-1966.

7 - RAIMONDI, A.A. & Boyd, J.- A Solution for the Finite Journal Bearings and its Application to Analysis and Design, Partes I,II,III- Transaction of the ASLE, vol.1, nº 1, 1958.

8 - STERNLICHT, B.& Reid, J.C. and Arwas, E.B.- Perfomance of Elastic, Centrally Pivoted, Sector, Thrust-Bearing Pads Parte 1 - Transaction of the ASME - Junho, 1961, Pag.168-178.

9 - NEAL, P.B.- Film Lubrication of Pad Thrust-Bearings. Int.J.Mech. Sei.Pergamon Press, 1966 vol.8-Pag.525-540.

10- ROELANDS, C.J.A., Vlugter, J.C. & Waterman, H.I. - The Viscosity-Temperature-Pressure Relationsship of Lubricatio Oils and its Correlation With Chemical Constitution- Trasaction ASME, dezembro, 1963;Pag.601-610.

11- PINKUS, O.-Solution for Reynolds Equation for Arbitrarilly Loaded Journal Bearings-Transaction of the ASME, Junho, 1961, pag.145-152.

APÊNDICE 1

MANUAL DO USUÁRIO

1 - DADOS

Para a utilização do programa o usuário fornece um conjunto de dados dispostos de acordo com as figuras 23 e 24 do capítulo 4 da dissertação. Para um mancal radial poderemos ter, por exemplo, a seguinte disposição:

```
$DADOS1 TEMP1=50.0,TEMP2=10.0,TEMP3=80.0,$
$DADOS2 VISK1=0.025,VISK2=0.242,VISK3=0.009,$
$DADOS3 MASSA=90.0,CALORE=2000.00,ROTACA=60.0,PIVOT=0.0897636,$
$DADOS4 M=14,N=16,FATOR=0.2,LIMITE=25,EPSILO=0.001,NUMERO=4,$
$AXIAL NULO
$RADIAL B=0.1524,L=0.254,H1=0.4826E-4,DEIXO=0.254,RSAPAT=0.1271,$
$CHAVES CHAVE=1=3.,CHAVE2=2.,CHAVE3=4.,CHAVE4=1.,$
```

e para um mancal axial

```
$DADOS1 TEMP1=50.0,TEMP2=10.0,TEMP3=80.0,$
$DADOS2 VISK1=0.025,VISK2=0.242,VISK3=0.009,$
$DADOS3 MASSA=90.0,CALORE=2000.00,ROTACA=30.48,$
$DADOS4 M=14,N=16,FATOR=0.2,LIMITE=25,EPSILO=0.001,NUMERO=10,$
$AXIAL R1=0.07747,R2=0.15367,H1=0.64E-4,DECLIV=10,ARC=0.666,H2=0.10E-3,$
$CHAVES CHAVE1=4,CHAVE2=3,CHAVE3=2,CHAVE4=2,$
```

Cada cartão contém uma lista de variáveis definida pela declaração NAMELIST. Os valores atribuídos às variáveis podem estar em qualquer formato (inteiro, real, dupla precisão, notação científica). Para maiores esclarecimentos o leitor pode consultar em livros de computação as regras da declaração NAMELIST.

Os cartões rotulados DADOS1, DADOS2, DADOS3, DADOS4 e CHAVES são comuns aos dois tipos de mancal (radial e axial) e neles estão representadas as seguintes variáveis:

TEMP1, TEMP2, TEMP3 - Três valores diferentes da temperatura do óleo;

VISK1, VISK2, VISK3 - três valores da viscosidade do óleo nas temperaturas TEMP1, TEMP2 e TEMP3 respectivamente;

MASSA - massa específica do óleo;

CALORE - calor específico do óleo;

ROTACA - rotação em RPS do mancal;

PIVOT - posição do pivô;

N - número de pontos da malha na direção z;

M - número de pontos da malha na direção x;

FATOR - fator de aceleração da convergência do método iterativo;

LIMITE - especifica o número máximo de iterações do campo de pressões para um determinado cálculo das temperaturas (pode variar, idealmente, entre 15 e 30);

EPSILO - variação mínima do campo de pressões entre duas iterações consecutivas;

NÚMERO - número de sapatas do mancal radial. Deve constar do cartão mesmo que se trate de mancal axial. Neste caso pode assumir um valor qualquer;

CHAVE1,...CHAVE4 - dados pela tabela 1 neste apêndice.

Os demais cartões são diferentes para mancais axiais e radiais. No primeiro caso teremos

```
$AXIAL R1=x,R2=y,H1=z,DECLIV=t,ARC2U,H2=w,$
```

onde

R1 = raio interno do mancal axial

R2 = raio externo

H1 = altura mínima do filme lubrificante

DECLIV = declividade da sapata

ARC = ângulo subentendido pela sapata

H2 = altura máxima

na figura 1 podemos observar todos estes valores.

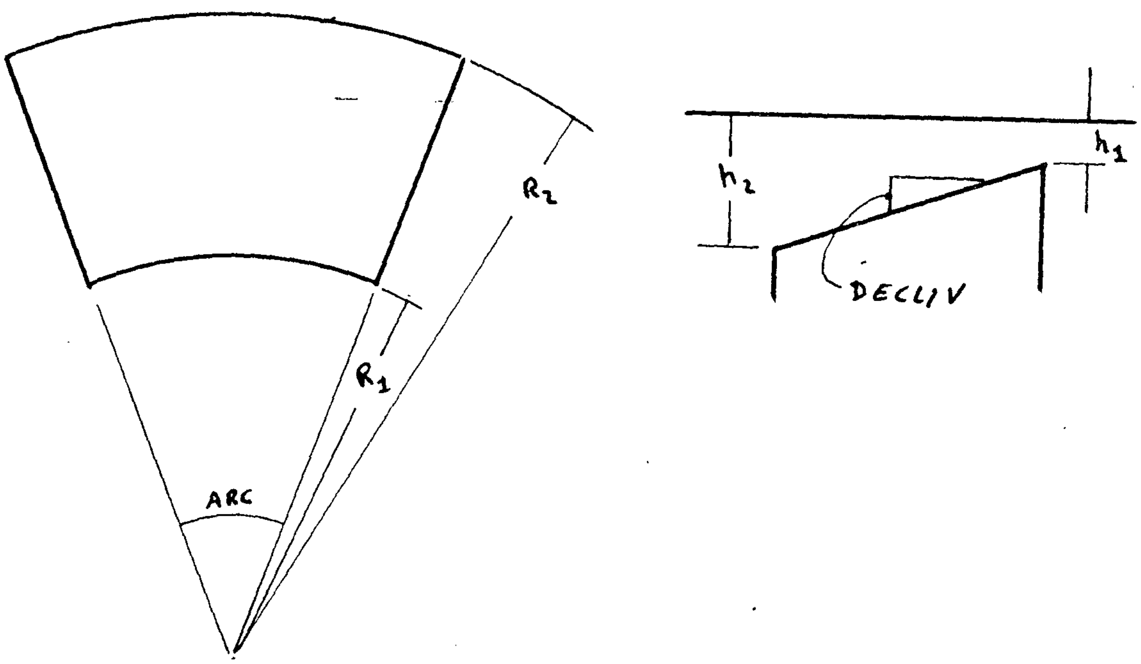


Fig. 1 - Sapata de mancal axial.

Para o segundo caso, mancal radial, o usuário informa ao programa que os dados seguintes se referem a um mancal radial pela declaração

$AXIAL NULO

e o cartão seguinte deve conter as seguintes variáveis:

B = Comprimento da sapata

L = largura da sapata

DEIXO = diâmetro do eixo do mancal

RSAPAT = raio de curvatura da sapata = (DEIXO + FOLGA)/2

TABELA 1 - FUNÇÕES DAS CHAVES DE CONTROLE DO PROGRAMA

Nº / CHAVE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CHAVE 1	Fórmula (3.1) Mancal Axial	Fórmula (3.4) Mancal Axial	Fórmula (3.11)	Fórmula (3.2)	Alturas dadas uma a uma	Espaço para Fórmula 6	Espaço para Fórmula 7	Espaço para Fórmula 8	Espaço para Fórmula 9	Espaço para Fórmula 10
CHAVE 2	Pivô Otimizado	Pivô dado	Sapata Fixa	-	-	-	-	-	-	-
CHAVE 3	-	-	-	Imprime os resultados de todas as sapatas e o total	Imprime o resultado da primeira e o total	-	-	-	-	-
CHAVE 4	Não imprime pressão. Temperat. Viscosidade	Imprime pressão temperatura Viscosidade da la. sapata	Imprime pressão temperat. viscosid. de todas as sapatas	-	-	-	-	-	-	-

Todos os dados devem estar em unidades absolutas (sistema internacional).

2 - FÓRMULAS PARA O CÁLCULO DA ESPESSURA DA PELÍCULA DO ÓLEO

A sub-rotina ALTURA dispõe, de acordo com a listagem do programa apresentada neste apêndice, de 4 fórmulas para o cálculo das alturas e tem condições de ler valores discretos dados um a um através de cartões perfurados. As fórmulas são alcançadas pela CHAVE 1 do seguinte modo:

CHAVE1 = 1 H(j) = H1 + (1 - 1.5)/M)(H2 - J1)

válida para qualquer i.(sapata fixa)

CHAVE1 = 2 H(j) = H1 + (1 - 1.5)/M)($H2_{variável}$-H1)

válida para qualquer i.

CHAVE1 = 3 H(j) = FOLGA + EXCENT*COS(β̂ + (XBARRA-(j-.5) X)/RS

CHAVE1 = 4 FÓRMULA (3.2)

CHAVE1 = 5 Leitura das alturas uma a uma.

Para a leitura dos valores de H(I,J) são estabelecidos os seguintes critérios:

1) As alturas variam apenas na direção x, ou seja, H(I,J) é constante para um dado I e qualquer J.
2) É usada apenas para sapata fixa de mancal axial.
3) H1 e H2 devem ser dadas normalmente no cartão AXIAL.
4) Os valores lidos devem corresponder aos pontos pivotais na ordem crescente em J.

H(1,1), H(1,2), ...H(1,J), ...H(1,MMM).

Os valores H(1,1) e H(1,MMM) que são fora da área da sapata devem ser extrapoladas.

5) O número de pontos dentro da área da sapata deve ser especificado normalmente no cartão DADOS 4 (M e N).

6) Os valores devem ser dados um por cartão, em milésimos de milímetros, podendo ser perfurados em qualquer posição do cartão e em qualquer formato. A título de ilustração damos a seguir um exemplo.

```
$DADOS1 TEMP1=50.0,TEMP2=10.0,TEMP3=80.0,$
$DADOS2 VISK1=0.025,VISK2=0.242,VISK3=0.009,$
$DADOS3 MASSA=90.0,CALORE=2000.00,ROTACA=30.48,$
$DADOS4 M=14,N=16,FATOR=0.2,LIMITE=25,EPSILO=0.001,NUMERO=10,$
$AXIAL R1=0.07747,R2=0.15367,H1=0.64E-4,DECLIV=0,ARC=0.666,H2=0.10E-3,$
$CHAVES CHAVE1=5,CHAVE2=3,CHAVE=2,CHAVE4=2,$
55
54
53
52
51
51
49
48
47
46
```

Se o número de pontos dados não coincidir com o valor M+2 o computador apresentará uma das seguintes mensagens:

FALTAM X PONTOS;

FORAM DADOS X PONTOS A MAIS.

3 - RESULTADOS

Os resultados são apresentados na seguinte ordem:

1º) Dados. O cartão que contém a denominação AXIAL ou RADIAL é impresso primeiro seguido dos cartões DADOS1, DADOS2, DADOS3, DADOS4 e CHAVES.

2º) São apresentadas as constantes da fórmula da viscosidade para a verificação dos dados do óleo. A constante TETA deve estar situada entre 85.0 e 105.0. Defasagens muito grandes em torno do valor 95.0 são ocasionadas por valores pouco precisos da viscosidade.

3º) Em se tratando de mancais axiais os resultados são apresentados na seguinte forma:

```
SAXIAL
 R1=  0.7747000E-01,  R2=  0.1536700    ,  H1=  0.6400000E-04,  DECLIV=  0.0000000E+00,  ARC=  0.6660000    ,  H2=  0.1000000E-03,
$
SDADOS1
 TEMP1=   50.00000    ,  TEMP2=   10.00000    ,  TEMP3=   80.00000    , $
SDADOS2
 VISK1=  0.2500000E-01,  VISK2=  0.2420000    ,  VISK3=  0.9000000E-02, $
SDADOS3
 MASSA=   90.00000    ,  CALORE=   2000.000    ,  ROTACA=   30.00000    ,  PIVOT=  0.4700000    , $
SDADOS4
 N=            21,  M=              18,  FATCR=  0.2000000    ,  LIMITE=                 25,  EPSILO=  0.1000000E-02,  NUMERC=
   10,
$
SCHAVES
 CHAVE1=   2.000000    ,  CHAVE2=   1.000000    ,  CHAVE3=   4.000000    ,  CHAVE4=   1.000000    , $
  BETA=   864.492      TETA=    95.032     CONSTANTE=   0.00006

                   ESTES RESULTADOS SE REFEREM A UMA(1) SAPATA DE MANCAL AXIAL
                                    CONFORME DADOS ACIMA E COM
                                          PIVOT OTIMIZADO
                                    FORCA NA  SAPATA =   2478.2354NEWTONS

                              COORDENADAS DO  **     R = .1162233400METROS

                          CENTRO DE PRESSOES ** TETA =  0.43957977RADIANOS

                        POTENCIA CONSUMIDA EM ATRITO =     29.6416WATTS

             FLUXO DE LUBRIFICANTE ENTRANDO POR SAPATA =-.285689E+00M3/SEG

                                       FLUXO LATERAL = .130318E-01M3/SEG

                              FLUXO NA ALTURA MINIMA = .100131E+00M3/SEG

               ELEVACAO DE TEMPERATURA DO LUBRIFICANTE =   24.603860GRAUS CENTIGRADOS

                                   TEMPERATURA MEDIA =   60.615056GRAUS CENTIGRADOS

                              VISCOSIDADE NA TEMPERATURA MEDIA =    0.016649PASCAL.SEG

PROGRAMA REALIZADO SEM ERROS (DE ACORDO COM OS DADOS)
```

Opcionalmente, ver CHAVE4 Tab. 1, poderão ser impressos os campos de pressão, temperaturas e viscosidades. Este resultado é válido para uma sapata e os valores FORCA RESULTANTE, FLUXOS E PERDA DE POTÊNCIA devem ser multiplicados pelo número de sapatas para a obtenção do resultado final.

Se for mancal radial os resultados serão:

- Resultados de sapata mais carregada.
- Resultados da segunda sapata.
- Resultados da terceira sapata.

....

- Resultados da i-ésima sapata, onde i é a metade do número de sapatas.
- Resultados totais.

Como exemplo, apresentamos os resultados de um mancal radial de 10 sapatas a seguir.

```
$RADIAL
 B=  0.7620000E-01,  L=  0.7620000E-01,  H1=  0.4000000E-04,  DEIXO=  0.4000000     ,  RSAPAT=  0.2000750     , $
$DADOS1
 TEMP1=    50.00000     ,  TEMP2=    10.00000     ,  TEMP3=   80.00000     , $
$DADOS2
 VISK1=  0.2500000E-01,  VISK2=  0.2420000     ,  VISK3=  0.9000000E-02, $
$DADOS3
 MASSA=    90.00000     ,  CALORE=   2000.000     ,  ROTACA=   30.00000     ,  PIVOT=  0.5715000E-01, $
$DADOS4
 N=             16,  M=              14,  FATOR=  0.2000000     ,  LIMITE=              25,  EPSILO=  0.1000000E-02,  NUMERC=
   10,
$
$CHAVES
 CHAVE1=   3.000000     ,  CHAVE2=   1.000000     ,  CHAVE3=   4.000000     ,  CHAVE4=   1.000000     , $
  BETA=   864.492       TETA=    95.032      CONSTANTE=   0.00006

                 ESTES RESULTADOS SE REFEREM A SAPATA MAIS CARREGADA  DO MANCAL RADIAL
                                    CONFORME DADOS ACIMA E COM
                                          PIVOT OTIMIZADO
                                    FORCA NA  SAPATA =  15070.8800NEWTONS

                          COORDENADAS  DO  ** XBARRA = .0444805950METROS

                         CENTRO DE PRESSOES ** ZBARRA =  0.04161915METROS

                         POTENCIA CONSUMIDA EM ATRITO =      3.5203WATTS

                   FLUXO DE LUBRIFICANTE ENTRANDO POR SAPATA =-.246185E-01M3/SEG

                                        FLUXO LATERAL = .716994E-02M3/SEG

                                  FLUXO NA ALTURA MINIMA = .159505E-01M3/SEG

                    ELEVACAO DE TEMPERATURA DO LUBRIFICANTE =   20.335265GRAUS CENTIGRADOS

                                     TEMPERATURA MEDIA =   59.988086GRAUS CENTIGRADOS

                              VISCOSIDADE NA TEMPERATURA MEDIA =    0.017027PASCAL.SEG

                 ESTES RESULTADOS SE REFEREM A SAPATA NUMERO  2 DO  MANCAL RADIAL
                                    FORCA NA  SAPATA =  13865.0070NEWTONS

                          COORDENADAS  DO  ** XBARRA = .0444806330METROS

                         CENTRO DE PRESSOES ** ZBARRA =  0.04163111METROS

                         POTENCIA CONSUMIDA EM ATRITO =      3.4707WATTS

                   FLUXO DE LUBRIFICANTE ENTRANDO POR SAPATA =-.256703E-01M3/SEG

                                        FLUXO LATERAL = .735171E-02M3/SEG

                                  FLUXO NA ALTURA MINIMA = .167888E-01M3/SEG

                    ELEVACAO DE TEMPERATURA DO LUBRIFICANTE =   19.087849GRAUS CENTIGRADOS

                                     TEMPERATURA MEDIA =   59.297116GRAUS CENTIGRADOS
```

```
                VISCOSIDADE NA TEMPERATURA MEDIA =    0.017458PASCAL.SEG

        ESTES RESULTADOS SE REFEREM A SAPATA NUMERO  3 DO  MANCAL RADIAL
                          FORCA NA  SAPATA =  12295.6340NEWTONS

             COORDENADAS  DO  ** XBARRA = .0444821800METROS

            CENTRO DE PRESSOES ** ZBARRA =  0.04164872METROS

            POTENCIA CONSUMIDA EM ATRITO =      3.3834WATTS

    FLUXO DE LUBRIFICANTE ENTRANDO POR SAPATA =-.272535E-01M3/SEG

                            FLUXO LATERAL = .762632E-02M3/SEG

                FLUXO NA ALTURA MINIMA = .180476E-01M3/SEG

     ELEVACAO DE TEMPERATURA DO LUBRIFICANTE =   17.378952GRAUS CENTIGRADOS

                       TEMPERATURA MEDIA =   58.379148GRAUS CENTIGRADOS

                VISCOSIDADE NA TEMPERATURA MEDIA =    0.018053PASCAL.SEG

        ESTES RESULTADOS SE REFEREM A SAPATA NUMERO  4 DO  MANCAL RADIAL
                          FORCA NA  SAPATA =  10964.7410NEWTONS

             COORDENADAS  DO  ** XBARRA = .0444815220METROS

            CENTRO DE PRESSOES ** ZBARRA =  0.04166529METROS

            POTENCIA CONSUMIDA EM ATRITO =      3.2885WATTS

    FLUXO DE LUBRIFICANTE ENTRANDO POR SAPATA =-.288355E-01M3/SEG

                            FLUXO LATERAL = .789878E-02M3/SEG

                FLUXO NA ALTURA MINIMA = .193058E-01M3/SEG

     ELEVACAO DE TEMPERATURA DO LUBRIFICANTE =   15.859489GRAUS CENTIGRADOS

                       TEMPERATURA MEDIA =   57.585576GRAUS CENTIGRADOS

                VISCOSIDADE NA TEMPERATURA MEDIA =    0.018590PASCAL.SEG

        ESTES RESULTADOS SE REFEREM A SAPATA NUMERO  5 DO  MANCAL RADIAL
                          FORCA NA  SAPATA =  10215.3220NEWTONS

             COORDENADAS  DO  ** XBARRA = .0444847690METROS

            CENTRO DE PRESSOES ** ZBARRA =  0.04167705METROS

            POTENCIA CONSUMIDA EM ATRITO =      3.2253WATTS

    FLUXO DE LUBRIFICANTE ENTRANDO POR SAPATA =-.298363E-01M3/SEG

                            FLUXO LATERAL = .804761E-02M3/SEG
```

```
                    FLUXO NA ALTURA MINIMA = .200779E-01M3/SEG
ELEVACAO DE TEMPERATURA DO LUBRIFICANTE =  15.006520GRAUS CENTIGRADOS
                      TEMPERATURA MEDIA =  57.141286GRAUS CENTIGRADOS
                    VISCOSIDADE NA TEMPERATURA MEDIA =   0.018900PASCAL.SEG

     RESULTADOS TOTAIS CONSIDERANDO TAMBEM AS SAPATAS SIMETRICAS
                              FORCA TOTAL= -12645.2880NEWTONS
       POTENCIA TOTAL CONSUMIDA EM ATRITO =     33.7764WATTS
                        FLUXO ENTRANDO TOTAL =-.272428E+00M3/SEG
                      EXCENTRICIDADE DO EIXO= .798014E-05 M
PROGRAMA REALIZADO SEM ERROS (DE ACORDO COM OS DADOS)
```

4 - FLUXOGRAMA E LISTAGEM DO PROGRAMA

O fluxograma apresentado é detalhado o suficiente para que os leitores, com a ajuda da listagem, possam entender todos os artifícios do programa e fazer uso dele o mais racionalmente possível. Este programa foi elaborado em um computador DEC-1091 e para adaptação em outros sistemas deve ser observado o seguinte:

a) As instruções separadas por ponto e vírgula (;) em uma mesma linha devem ser colocadas em linhas diferentes, na mesma ordem. Exemplo

```
DR = (R2 - R1)/(N*R2); DDR = DR; DARC = ARC/M
```

ficará na forma

```
DR = (R2 - R1)/(N*R2)
DDR = DR
DARC = ARC/M
```

b) No DEC-1091 não existe 'lixo" (valores remanescentes de outros programas). Todas as variáveis, ao se iniciar um programa, podem ser consideradas iniciadas com (0) zero. Por este motivo não foi 'zerada' nenhuma variável usada nos somatórios.

c) Os nomes das variáveis, em sua maioria, não foram abreviados de forma que a leitura da listagem ficou bastante simples. O DEC-1091 aceita na listagem nomes de variáveis de qualquer tamanho embora, na compilação, ele só considere as seis primeiras letras. Assim, na listagem, temos por exemplo

```
COEFICIENTETEMP=MASSA*CALOR ESPECIFICO/QOEFICIENTEPRES
```

na linha 02500 embora na compilação o computador considere apenas

```
QOEFIC=MASSA*CALORE/QOEFIC
```

Note-se que as variáveis COEFICIENTETEMP e QOEFICIENTE-PRES, que devem ser identificadas pelas seis primeiras letras, começam com C e Q respectivamente. Para computadores que não admitem esta facilidade as variáveis devem ser truncadas após a sexta letra.

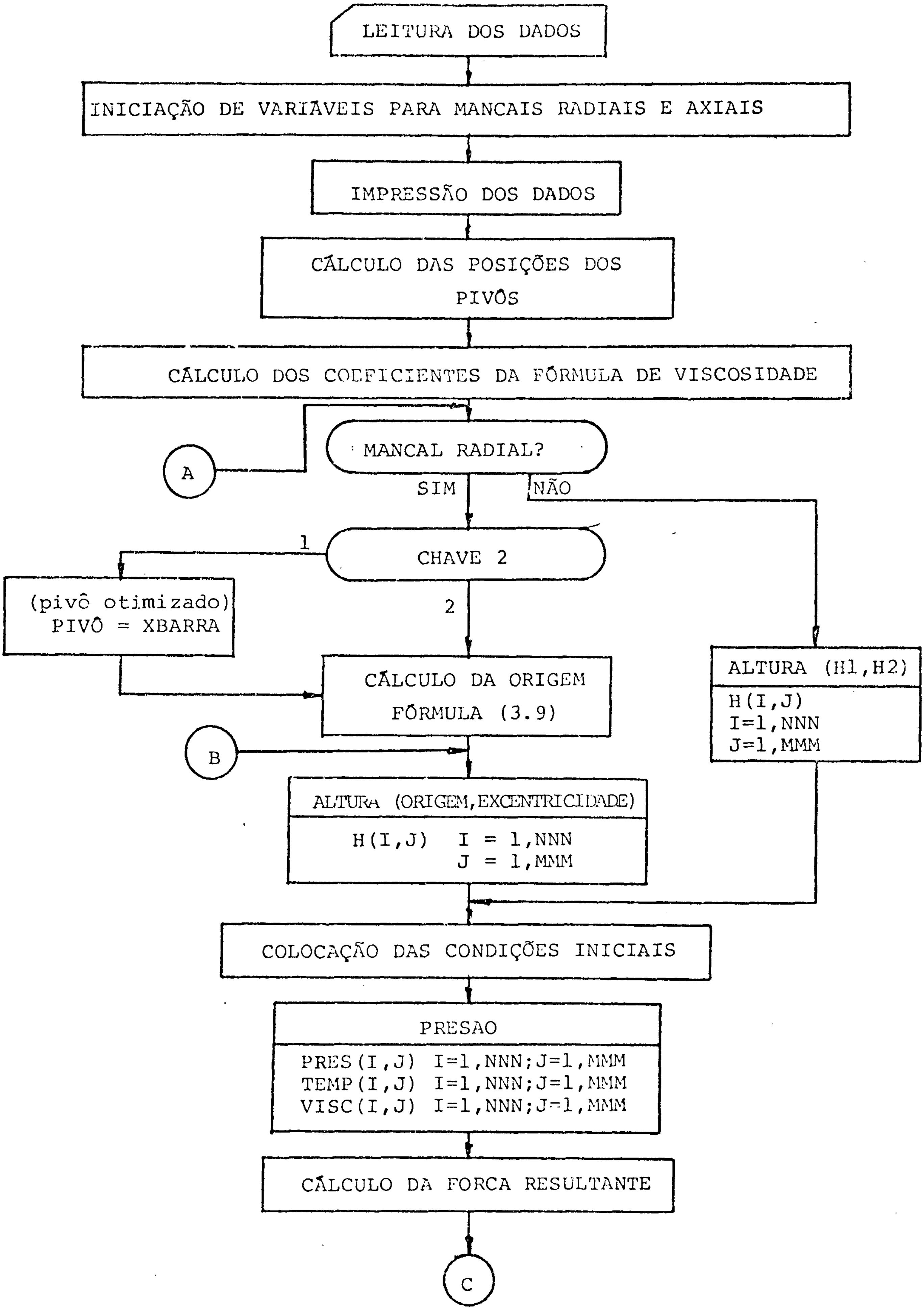
d) As mensagens de erro são impressas pela declaração STOP. Por exemplo, na declaração

STOP ' PRESSAO NAO ESTA CONVERGINDO, PROVAVELMENTE
1A FOLGA ESTA MUITO GRANDE'

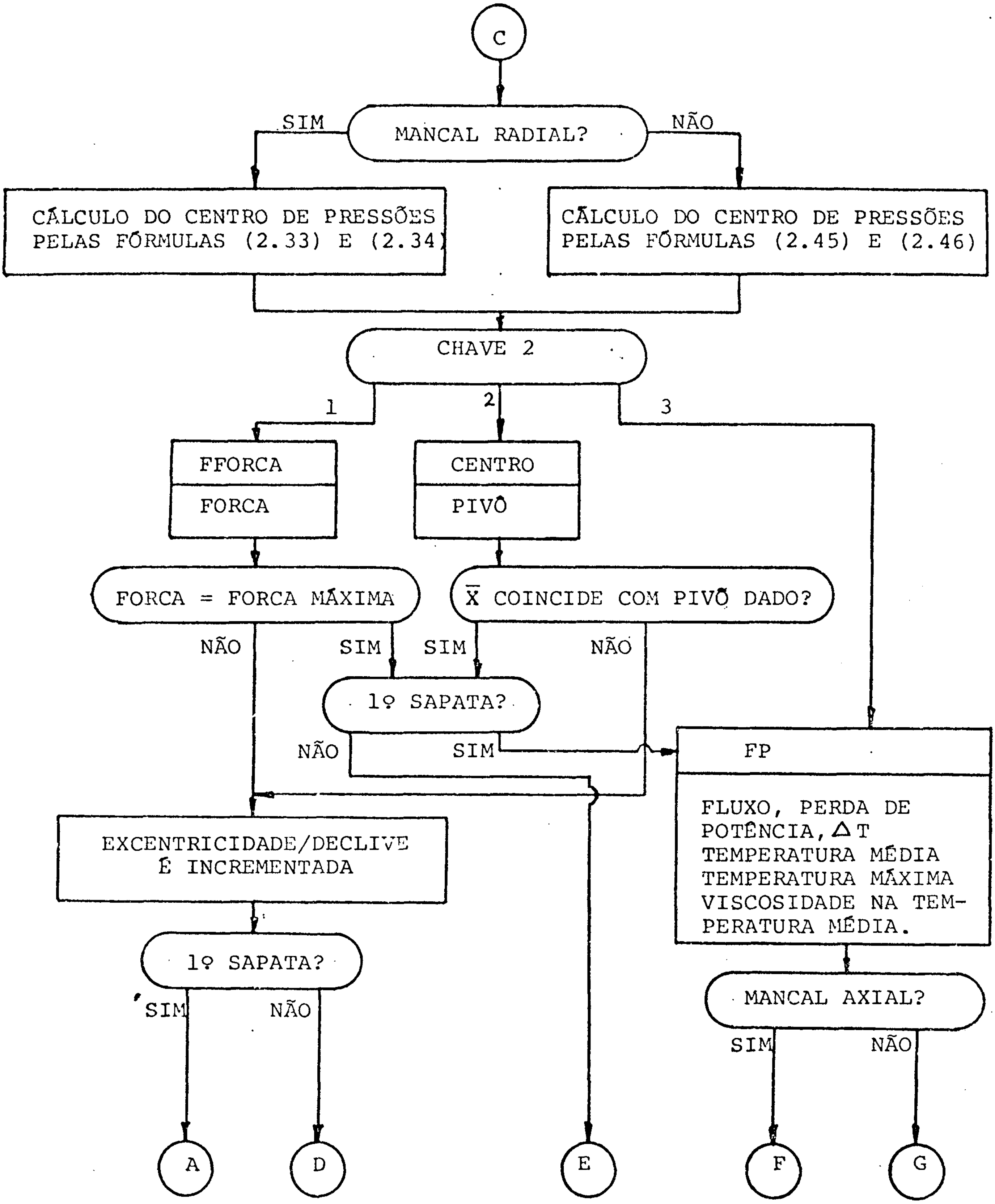
a cadeia de caracteres entre aspas é impressa automaticamente quando o programa para neste 'stop'.

e) O programa foi editado através de terminais de vídeo e por isto os caracteres numéricos que indicam continuação de linha aparecem, algumas vezes, na posição 9 em vez da posição normal 6. Isto pode ser observado no exemplo apresentado no item d). A coluna 9 é o primeiro tabulador dos terminais.

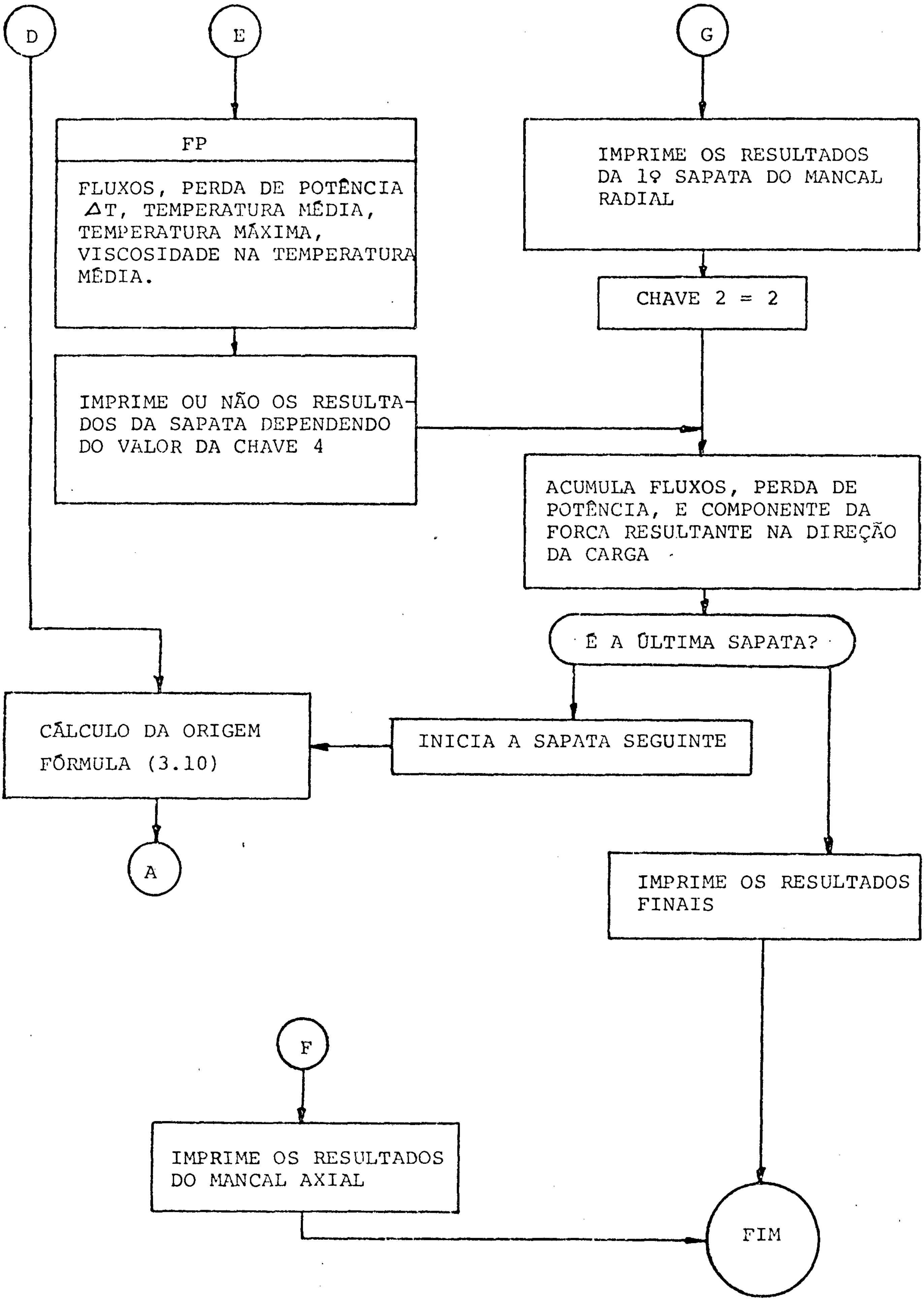
f) Como sinal de exponenciação foi usado (^) em vez de (**).



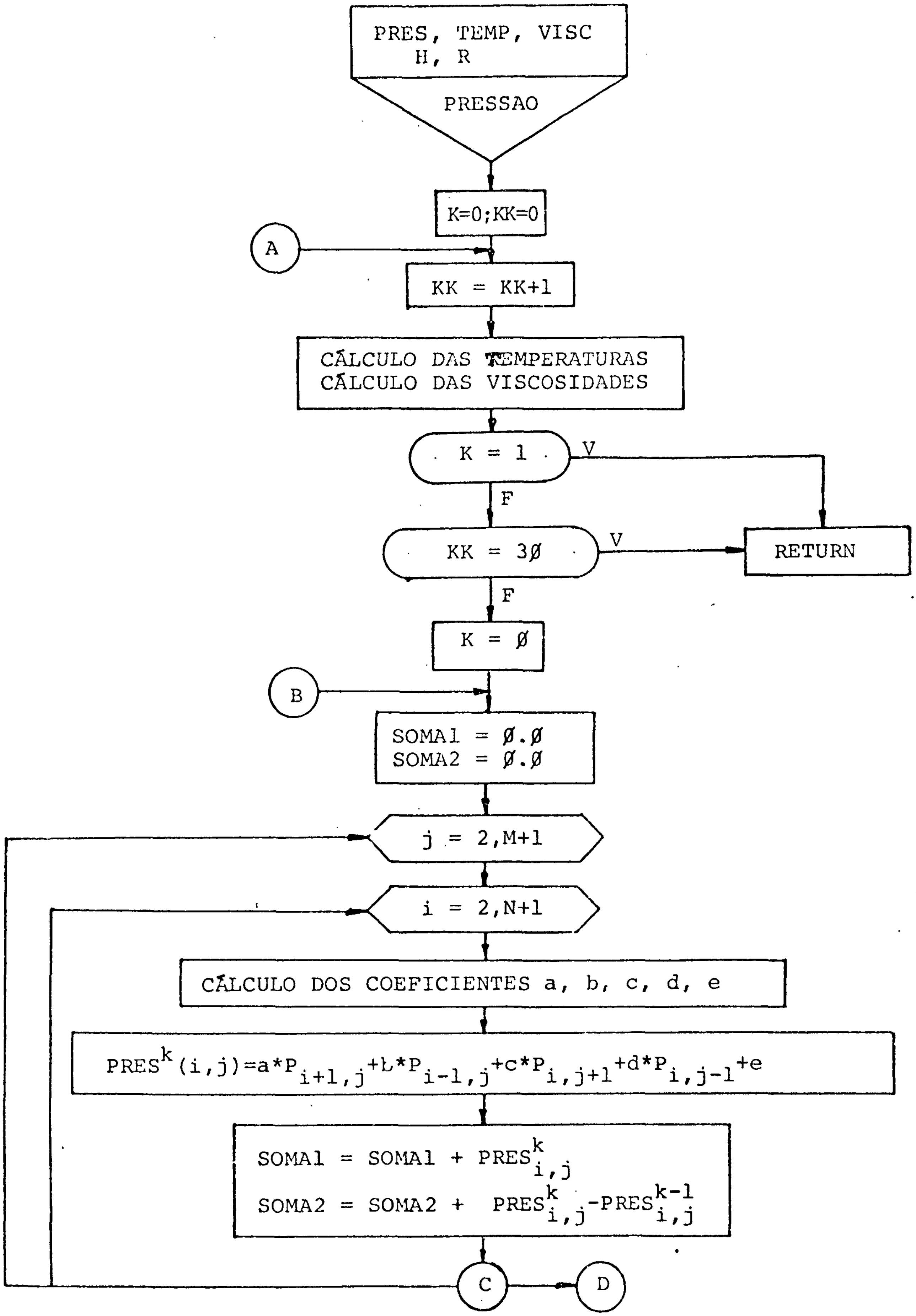
Fluxograma do programa principal - parte 1 -



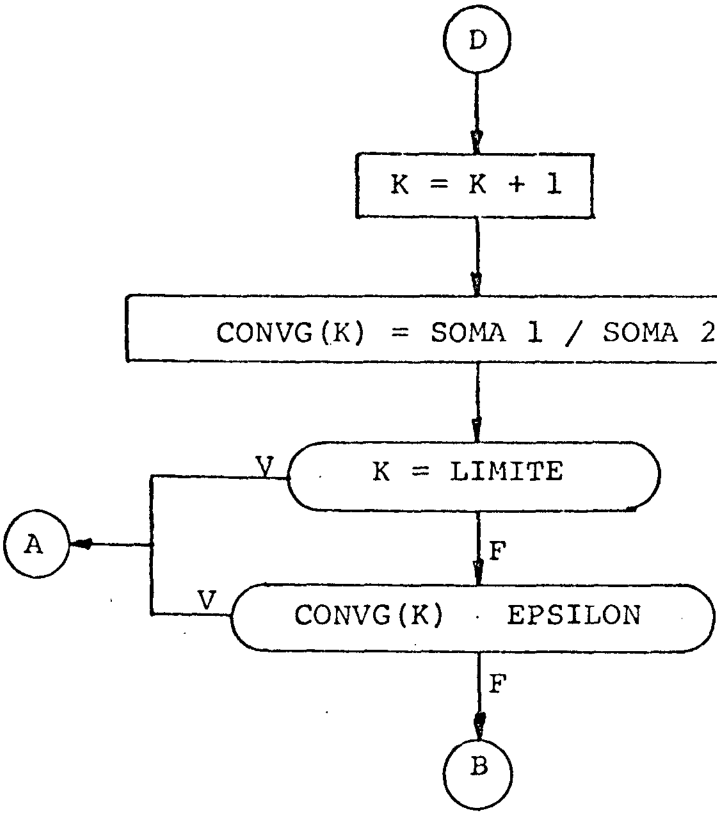
Fluxograma do programa principal - parte 2 -



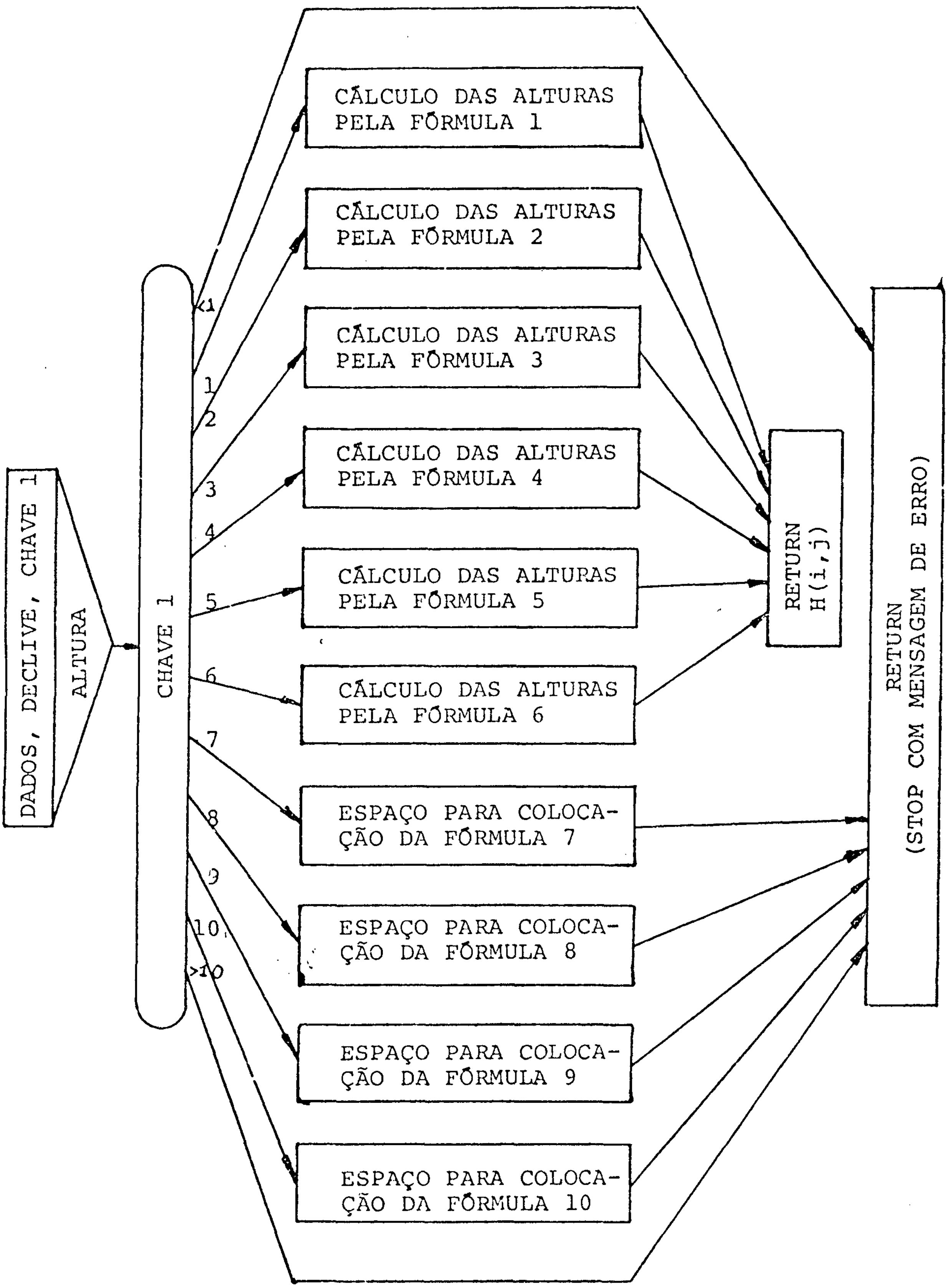
Fluxograma do programa principal - parte 3 -



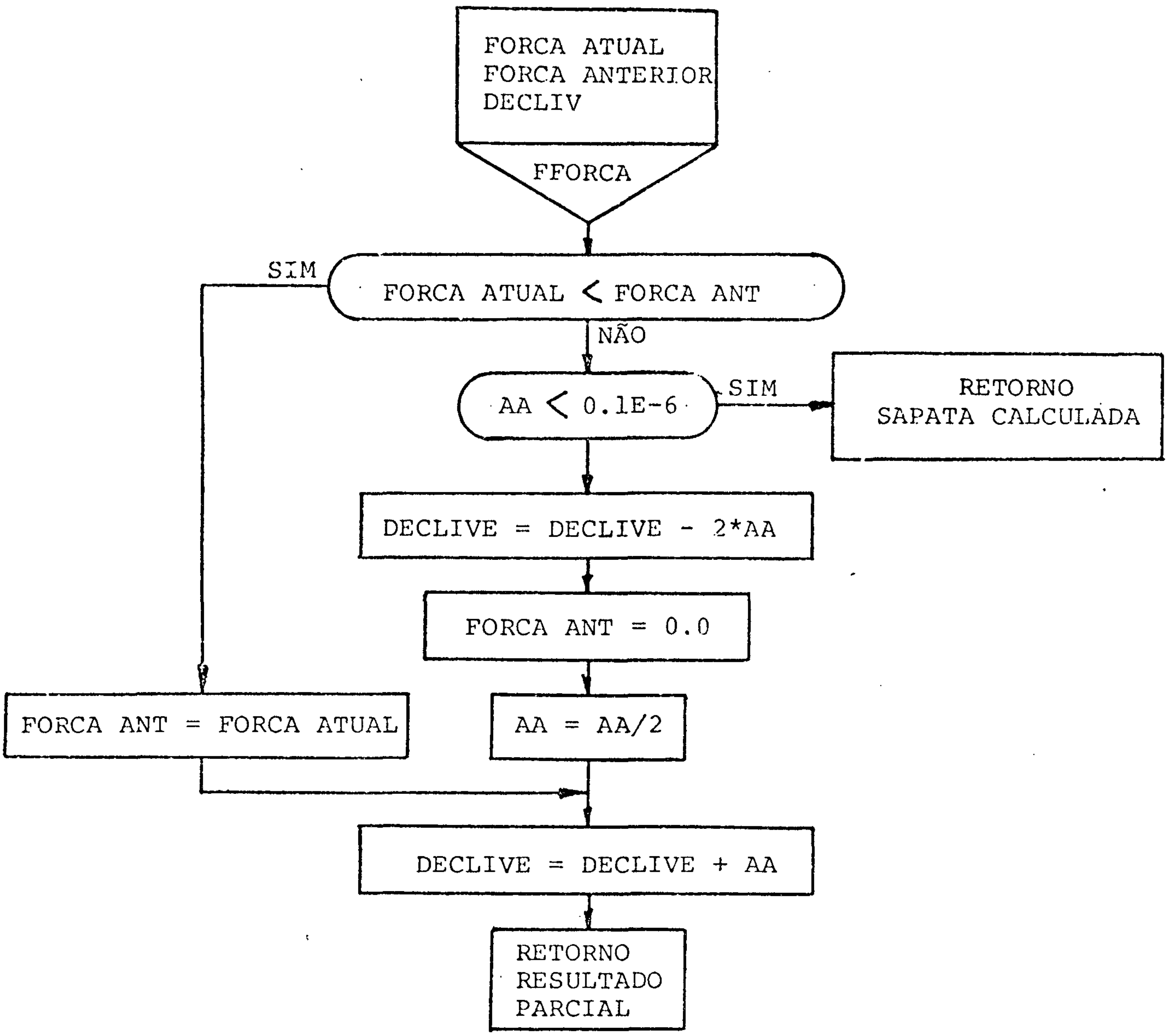
Fluxograma da sub-rotina PRESAO - parte 1 -



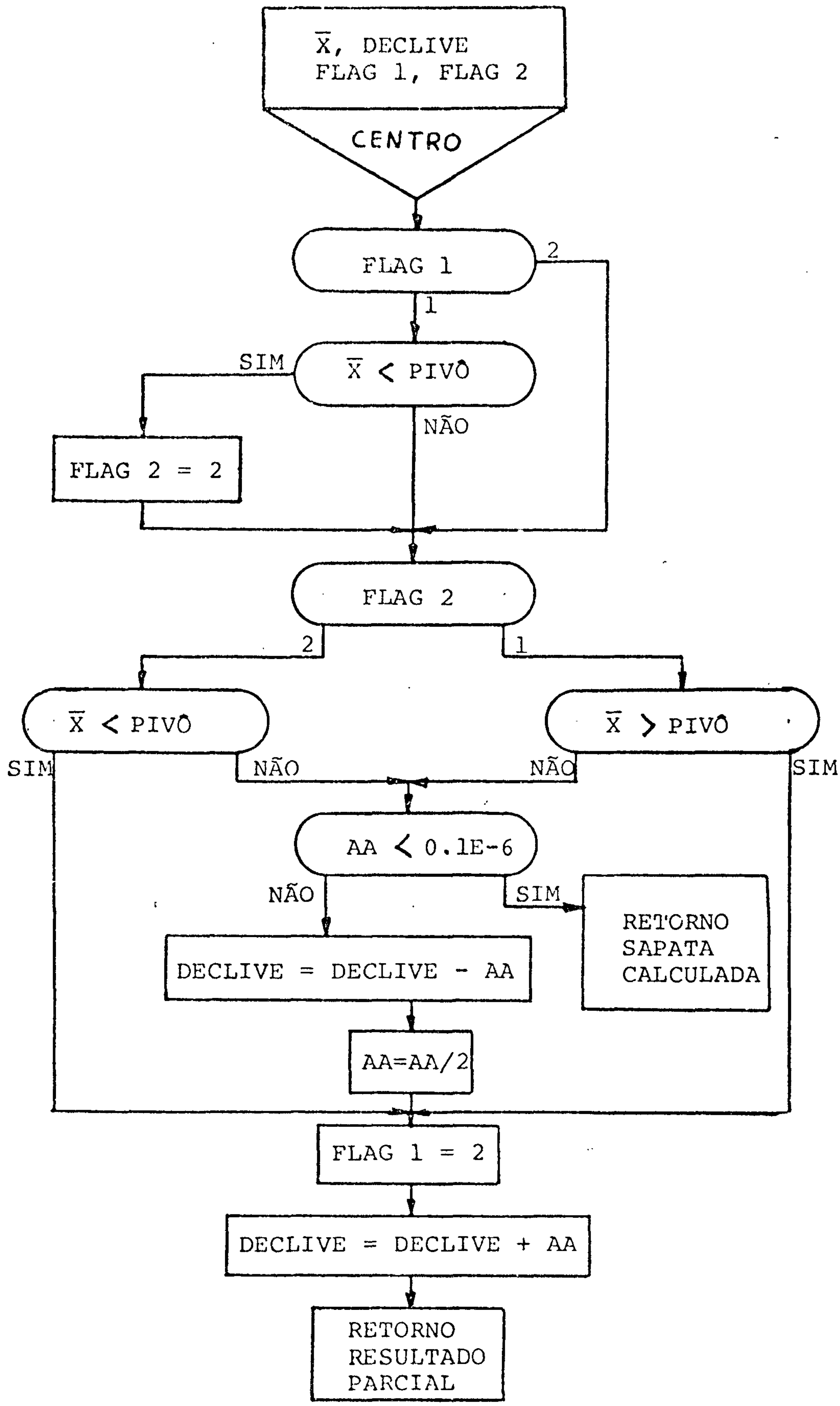
Fluxograma da sub-rotina PRESAO - parte 2 -



FLUXOGRAMA - SUB-ROTINA ALTURA



Fluxograma sub-rotina FFORCA



Fluxograma sub-rotina CENTRO

```
      PROGRAM FERRAZ
      DIMENSION PRES(32,32), TEMP(32,32),VISC(32,32),H(32,32),R(32),
     1 POSICAO(20),U(32)        ,RR(32)
      COMMON/AREA1/PRES,TEMP,VISC,R,DR,DDR,DARC,VISK1,CONSTA,BETA,TETA
     1 /AREA2/H1,H2,CHAVE1,RSAPAT,X,X2,DELTAX,B/AREA3/FORCA,FORSA/AREA4/
     2 TETABA,RET,FLAG1,FLAG2
      COMMON/AREA5/U,FLUXO1,FLUXO2,FLUXOL,FERDAT,DELTAT,TEMPME,VISCME,
     3 FLUXO,POTENC/AREA6/H,PIVOT,AA//M,MM,MMM,N,NN,NNN
      COMMON/AREA7/R2
      COMMON/AREA8/FATOR
        COMMON/AREA9/FOLGA,ORIGEM
        COMMON/AREA10/DECLIV
        COMMON/AREA11/POSICA,LL
      REAL MASSA,INTEGRAL,L
        REAL X
      NAMELIST/DADOS1/TEMP1,TEMP2,TEMP3/DADOS2/VISK1,VISK2,VISK3/DADOS3/
     1 MASSA,CALOR ESPECIFICO,ROTACA,PIVOT/DADOS4/M,N,FATOR,LIMITE,EPSIL
     2ON,NUMERO DE SAPATAS/AXIAL/R1,R2,H1,DECLIVE,ARC,H2/RADIAL/B,L,H1,
     3 D EIXO ,RSAPATA/CHAVES/CHAVE 1,CHAVE 2,CHAVE 3,CHAVE 4
        OPEN(UNIT=3,DEVICE='DSK',FILE='IMPRE1.DAT')
        PRIME=1.0
      READ(2,DADOS1); READ(2,DADOS2); READ(2,DADOS3); READ(2,DADOS4)
      READ(2,AXIAL,ERR=2); READ(2,CHAVES)
      DR=(R2-R1)/(N*R2); DDR=DR; DARC=ARC/M; PI=3.141592654
      QOEFICIENTEPRES=12*PI*(R2/H1)^2*ROTACAO*VISK1
      COEFICIENTETEMP=MASSA*CALOR ESPECIFICO/QOEFICIENTEPRES
      NNN=N+2; DO 1 I=1,NNN
      RR(I)=(R1+(FLOAT(I)-1.5)*DR*R2)/R2
    1 U(I)=2*PI*ROTACAO*RR(I)
        IF(CHAVE2#1.0)PIVOT=ARC/2
       TIPO=1.0 ; HH1 = H1; AA = 0.1E-2
        IF(CHAVE2==1)AA=.1E-3
        RET=3.0; B = ARC*(R2+R1)/2
        DDC = 0.1E-5
      WRITE(3,AXIAL); GO TO 5
    2 READ(2,RADIAL)  ;READ(2,CHAVES); FOLGA=(2*RSAPATA-D EIXO)/2
        DELTA E =FOLGA/10; EXCENTRICIDADE = DELTA E
      DELTA Z=L/(B*N);DELTA X=1./M; NNN=N+2; LL=1; PI=3.141592654
        RET = 3.0
      QOEFICIENTEPRES=6*VISK1*PI*D EIXO*ROTACAO/B
      COEFICIENTETEMP=6*MASSA*CALOR ESPECIFICO/QOEFICIENTEPRES
      DO 3 I=1,NNN; RR(I)=1.0;  U(I) = PI*ROTACAO*D EIXO
    3 CONTINUE;  DECLIVE=DELTA E; DARC=DELTA X; DR=DELTAZ
        IF(CHAVE2#2.0)PIVOT=3*B/4
      DDR=0.0; R2=B;    HH1 = B  ! [B ADMENSIONALIZA H1 DO M. RADIAL]
        AA=DELTA E; FORCA TOTAL=0.0
        TETA BARRA = PIVOT; DDC = DELTAE*0.01
C     CALCULO DAS POSICOES DAS SAPATAS
      NUM=NUMERO DE SAPATAS/2; ANGULO=2*PI/NUMERO DE SAPATAS
      POSICAO(1)=PI - ANGULO/2
      DO 4 I=2,NUM; II=I
    4 POSICAO(I)=POSICAO(II-1)-ANGULO
      WRITE(3,RADIAL)
    5 WRITE(3,DADOS1); WRITE(3,DADOS2); WRITE(3,DADOS3); WRITE(3
        1,DADOS4)
      WRITE(3,CHAVES); FORSA = 0.0
      POTENCIA=0.0; NN=N+1; MM=M+1; MMM=M+2; FLUXO=0.0
C     CALCULO DOS COEFICIENTES DA FORMULA DE VOGEL
      P=ALOG(VISK1/VISK2)/ALOG(VISK1/VISK3)
      Q=(TEMP2-TEMP1)/(TEMP3-TEMP1)
```

```
       TETA=(P*TEMP2-O*TEMP3)/(O-P)
       BETA=ALOG(VISK1/VISK2)*(TEMP1+TETA)*(TEMP2+TETA)/(TEMP2-TEMP1)
       CONSTANTE=VISK1/EXP(BETA/(TEMP1+TETA))
       WRITE(3,55555)BETA,TETA,CONSTANTE
55555 FORMAT('   BETA=',F10.3,6X,'TETA=',F10.3,6X,'CONSTANTE=',F10.5)
         FLAG1=1.0;FLAG2=1
         IF(CHAVE1==2) DECLIVE=H2+.1E-5
553     IF(TIPO==1.0)CALL ALTURA(S6,S23,S183,DECLIVE)
         IF(CHAVE1==2)CALL ALTURA(S6,S23,S183)
        GO TO 554
33       DECLIVE=DECLIV+DELTA E
         CONT=CONT+1
         IF(CONT>=5.0)STOP 'PRESSAO NAO ESTA CONVERGINDO,
         1 PROVAVELMENTE A FOLGA ESTA'' MUITO GRANDE'
       IF(TIPO==1.0)STOP ' PRESSAO NAO CONVERGE'
554      GO TO (1100,1200)CHAVE2
1100     PIVOT=TETABARRA
1200     HPIVOT=FOLGA+DECLIV*COS(POSICAO(LL))
         C=(B-PIVOT)/RSAPATA
         ORIGEM=ATAN((COS (C) -(H1-FOLGA)/(HPIVOT-FOLGA))/SIN(C))
         DESVIO=(HPIVOT-FOLGA)/COS(ORIGEM)
555    CALL ALTURA(S6,S23,S183,DESVIO)
C      COLOCACAO DAS CONDICOES INICIAIS
6      DO 7 I=1,NNN; R(I)=RR(I); DO 7 J=1,MMM
       TEMP(I,J)=TEMPI*COEFICIENTETEMP; PRES(I,J)=0.0; VISC(I,J)=1.0
7      CONTINUE
         CALL PRESAO(COEFIC,LIMITE,EPSILO,S33)
       DO 8 I=1,NNN; R(I)=R(I)*R2; DO 8 J=1,MMM; H(I,J)=H(I,J)*HH1
       PRES(I,J)=PRES(I,J)*COEFICIENTEPRES
       TEMP(I,J)=TEMP(I,J)/COEFICIENTETEMP
8      VISC(I,J)=VISC(I,J)*VISK1 ; INTEGRAL=0.0
       DO 9  I=2,NN; DO 9 J= 2,MM
9      INTEGRAL=INTEGRAL+PRES(I,J)*R(I)
       FORCA=DR*R2*DARC*INTEGRAL
       IF(TIPO*1.0) GO TO 11 ! TIPO DIFERENTE DE 1 INDICA MANCAL RADIAL *********
       XBARRA=0.0; YBARRA=0.0; DO 10 I=2,NN; DO 10 J=2,MM
       XBARRA=XBARRA+R(I)^2*SIN((FLOAT(I)-1.5)*DARC)*PRES(I,J)*DARC*
      1 DR*R2
    10 YBARRA=YBARRA+R(I)^ 2*COS((FLOAT(I)-1.5)*DARC)*PRES(I,J)*DARC*
      1 DR*R2
        XBARRA=XBARRA/FORCA; YBARRA=YBARRA/FORCA
        RBARRA=SQRT(XBARRA^2 + YBARRA^2)
        TETA BARRA = ASIN(XBARRA/RBARRA)
         TYPE *,FORCA,TETABA,DECLIVE
       GO TO (14,15,16)CHAVE 2
11     XBARRA=0.0; ZBARRA=0.0; DO 12 I=2,NN; DO 12 J=2,MM
       XBARRA=XBARRA + PRES(I,J)*(FLOAT(J)-1.5)
12     ZBARRA=ZBARRA + PRES(I,J)*(FLOAT(I)-1.5)
         ZBARRA = ZBARRA*(DELTA Z*B)^2*DELTA X*B     / FORCA
          XBARRA = XBARRA*(DELTA X*B)^2*DELTA Z*B/FORCA
           TETA BARRA = XBARRA
         TYPE *,TETABA, FORCA,LL
13     GO TO (14,15,16)CHAVE 2
14       CALL EFORCA(S553,S155,DDC)
15     CALL CENTRO(S553,S182,S16,S20,S21,DDC,PRIME,CHAVE2,TIPO)
155    PIVOT=TETA BARRA ! **ATUALIZACAO FINAL DA POSICAO DO PIVOT *******
16     IF(TIPO==1.0)GO TO 40
       EXCENTRICIDADE=DECLIVE;GO TO 15
18     X2=RSAPATA^2+EXCENT^2+2*RSAPATA*EXCENT*COS(POSICAO(LL))
         X=SQRT(X2);AA=0.1E-4
```

```
          FLAG1=1;FLAG2=1
          DECLIVE=ABS(RSAPATA-X) +0.1E-5; FORSA = 0.0
   182    ORIGEM=ACOS((X2+DECLIVE**2-RSAPATA**2)/(2*X*DECLIVE))
            CALL ALTURA(S6,S23,S183,DECLIV)
   183      DECLIVE=DECLIVE+AA; GO TO 182
   19     PET=CHAVE 3
   20     AA=0.1E-4;GO TO(45,49)PRIME
       21 CALLFP(S211)
   211    AA=0.1E-4
          FORCA TOTAL= FORCA T+2*FORCA*COS(POSICAO(LL));CHAVE 2=2;PRIME=2
          IF(2*LL==NUMERO DE SAPATAS)GO TO 50
          LL=LL+1; GO TO 18
   22     STOP ' PROGRAMA REALIZADO SEM ERROS (DE ACORDO COM OS DADOS)'
   23     STOP ' NAO FOI ENCONTRADA NA SUBROTINA -ALTURA- A EXPRESSAO
         1 CORRESPONDENTE AO NUMERO DA CHAVE1 OU O NUMERO E MAIOR QUE 10'
   / IMPRESSAO DE RESULTADOS
   40     WRITE(3,51); WRITE(3,52); IF(CHAVE 2-2)41,42,43
   41     WRITE(3,53); CALL FP(S44)
   42     WRITE(3,54); CALL FP(S44)
   43     WRITE(3,55); CALL FP(S44)
   44     WRITE(3,56) FORCA,RBARRA,TETA BARRA,PERDAT,FLUXO1,FLUXOL,
         1 FLUXO2,DELTAT,TEMPMEDIA,VISCMEDIA
          GO TO(22,62,63)CHAVE4
   45     WRITE(3,58)   ;WRITE(3,52);IF(CHAVE 2-2)46,47,48
   46     WRITE(3,53); CALL FP(S491)
   47     WRITE(3,54); CALL FP(S491)
   48     WRITE(3,55); CALL FP(S491)
   49     WRITE(3,59)LL; CALL FP(S491)
   491    WRITE(3,57)FORCA,XBARRA,ZBARRA,PERDAT,FLUXO1,FLUXOL,FLUXO2,
         1DELTAT, TEMP MEDIA, VISC MEDIA ;  GO TO(211,62,63)CHAVE4
   50     WRITE(3,60); WRITE(3,61) FORCA T,POTENC,FLUXO,EXCENTRICIDADE
          GO TO 22
   51     FORMAT(//35X,'ESTES RESULTADOS SE REFEREM A UMA(1) SAPATA DE MANCA
            1L AXIAL')
   52     FORMAT(52X,'CONFORME DADOS ACIMA E COM')
   53     FORMAT(57X,'PIVOT OTIMIZADO')
   54     FORMAT(57X,'PIVOT CENTRADO')
   55     FORMAT(58X,'SAPATAS FIXAS')
   56     FORMAT(52X,'FORCA NA  SAPATA =',F12.4,'NEWTONS'//45X,'COORDENADAS
         1DO  **    R ='F12.10'METROS'//42X,'CENTRO DE PRESSOES ** TETA ='F1
         12.8'RADIANOS'           //40X,'POTENCIA CONSUMIDA EM ATRITO ='F12.4'
         1WATTS'//27X,'FLUXO DE LUBRIFICANTE ENTRANDO POR SAPATA ='E12.6'M3/
         1SEG'//55X,'FLUXO LATERAL ='E12.6'M3/SEG'//46X,'FLUXO NA ALTURA MIN
         1IMA ='E12.6'M3/SEG'//29X,'ELEVACAO DE TEMPERATURA DO LUBRIFICANTE
         1='F12.6'GRAUS CENTIGRADOS'//51X,'TEMPERATURA MEDIA ='F12.6'GRAUS C
         1ENTIGRADOS'//46X,'VISCOSIDADE NA TEMPERATURA MEDIA ='F12.6'PASCAL.
         1SEG')
       57 FORMAT(52X,'FORCA NA  SAPATA ='F12.4,'NEWTONS'//42X,'COORDENADAS
         1DO  ** XBARRA ='F12.10'METROS'//40X,'CENTRO DE PRESSOES ** ZBARRA
         1='F12.8'METROS'          //40X,'POTENCIA CONSUMIDA EM ATRITO ='F12.4'
         1WATTS'//27X,'FLUXO DE LUBRIFICANTE ENTRANDO POR SAPATA ='E12.6'M3/
         1SEG'//55X,'FLUXO LATERAL ='F12.6'M3/SEG'//46X,'FLUXO NA ALTURA MIN
         1IMA ='E12.6'M3/SEG'//29X,'ELEVACAO DE TEMPERATURA DO LUBRIFICANTE
         1='F12.6'GRAUS CENTIGRADOS'//51X,'TEMPERATURA MEDIA ='F12.6'GRAUS C
         1ENTIGRADOS'//46X,'VISCOSIDADE NA TEMPERATURA MEDIA ='F12.6'PASCAL.
         1SEG')
   58    FORMAT(//31X,'ESTES RESULTADOS SE REFEREM A SAPATA MAIS CARREGADA
            1 DO MANCAL RADIAL')
   59    FORMAT(//34X,'ESTES RESULTADOS SE REFEREM A SAPATA NUMERO 'I2' DO
            1 MANCAL RADIAL')
```

```
60     FORMAT(//36X,'RESULTADOS TOTAIS CONSIDERANDO TAMBEM AS SAPATAS SIM
          1ETRICAS')
61     FORMAT(62X,'FORCA TOTAL='F12.4'NEWTONS'//39X
      1,'POTENCIA TOTAL CONSUMIDA EM ATRITO ='F12.4'WATTS'//53X,'FLUXO EN
      1TRANDO TOTAL ='E12.6'M3/SEG'//51X,'EXCENTRICIDADE DO EIXO='E12.6'
          1M')
62     CHAVE 4=1
63     WRITE(3,64)LL
64     FORMAT('1',T60,'CAMPO DE PRESSOES EM NEWTONS/M2 DA SAPATA NUMERO'
          1I2)
       DO 66 JJ=2,NN
       I=NN+2-JJ
       WRITE(3,65)(PRES(I,J),J=2,MM)
65     FORMAT('0',8E15.7)
66     CONTINUE
       WRITE(3,67)
67     FORMAT('1',T60,'CAMPO DE TEMPERATURAS EM GRAUS CENTIGRADOS')
       DO 68 JJ=2,NN
       I=NN+2-JJ
       WRITE(3,65)(TEMP(I,J),J=2,MM )
68     CONTINUE
       WRITE(3,69)
69     FORMAT('1',T58,'CAMPO DE VISCOSIDADE EM PASCAL.SEG')
       DO 70 JJ=2,NN
       I=NN+2-JJ
       WRITE(3,65)(VISC(I,J),J=2,MM)
70     CONTINUE
       IF(TIPO==1.0) GOTO 22
       GO TO 21
       END
          SUBROUTINE PRESAO(COEFIC,LIMITE,EPSILO,*)
**************************************************************
****************************************************************
****************************************************************
****************************************************************
C-ESTA SUBROTINA CALCULA OS VALORES DAS TEMPERATURAS,VISCOSIDADES E PRESSOES RE
C-TORNANDO AO PROGRAMA PRINCIPAL  APOS SATISFEITOS OS LIMITES DE CONVERGENCIA
       DIMENSION PRES(32,32),TEMP(32,32),VISC(32,32),H(32,32),R(32),DIF1
      1 (32),DIF2(32),CONVG(30)
       COMMON/AREA1/PRES,TEMP,VISC,R,DR,DDR,DARC,VISK1,CONSTA,BETA,TETA
          1/AREA6/H,PIVOT,AA//M,MM,MMM,N,NN,NNN
       COMMON/AREA8/FATOR
       K=0; KK=0; REL=DARC/DR
     1 KK=KK+1
       DO 3 J=2,MM; DO 2 I=2,NN; A=(H(I,J)/R(I))^2/VISC(I,J)
       B=(PRES(I,J+1)-PRES(I,J-1))/(2*DARC)
       C=(PRES(I+1,J)-PRES(I-1,J))/(2*DR)
       TEMP(I,J+1)=2*DARC*(1./3./A+A*(B^2+R(I)^2*C^2)+A*R(I)^2*C*
      1 (TEMP(I+1,J)-TEMP(I-1,J))/(2*DR)+(1-A*B)*TEMP(I,J-1)/(2*DARC))/
      2 (1-A*B)
     2 CONTINUE
       TEMP(1,J+1)=TEMP(2,J+1); TEMP(NNN,J+1)=TEMP(NN,J+1)
     3 CONTINUE
/CALCULO DA VISCOSIDADE
       DO 4 I=1,NNN; DO 4 J=2,MMM
     4 VISC(I,J)=CONSTANTE*EXP(BETA/(TEMP(I,J)/COEFIC+TETA))/VISK1
       DO 5 I=1,NNN
     5 VISC(I,1)=2*VISC(I,2)-1
/CALCULO DAS PRESSOES
            IF(K==1)RETURN
```

```
            IF(KK>30)RETURN 1
            K=0
        6 SOMA1=0.0; SOMA2=0.0; DO 7 J=2,MM
            DO 7 I=2,NN;S=VISC(I,J)
          T=VISC(I+1,J); U=VISC(I-1,J); V=VISC(I,J+1); W=VISC(I,J-1)
          FAT1=(R(I)+DDR/2)*(H(I,J)+H(I+1,J))^3/(4*(S+T))
          FAT2=(R(I)-DDR/2)*(H(I,J)+H(I-1,J))^3/(4*(S+U))
          FAT3=(H(I,J)+H(I,J+1))^3/(4*(S+V)*R(I))
          FAT4=(H(I,J)+H(I,J-1))^3/(4*(S+W)*R(I))
          DENOM=(FAT1+FAT2)*REL^2+FAT3+FAT4
          A=FAT1*REL^2;B=FAT2*REL^2; C=FAT3
          D=FAT4;E=R(I)*(H(I,J-1)-H(I,J+1))*DARC/2
          PRESS=A*PRES(I+1,J)+B*PRES(I-1,J)+C*PRES(I,J+1)+D*PRES(I,J-1)+E
          PRESS=PRESS/DENOM
          DIF=PRESS-PRES(I,J); PRES(I,J)=PRESS
          SOMA1=SOMA1+ABS(PRESS); SOMA2=SOMA2+ABS(DIF)
          IF(J-2)62,62,61
   61     PRES(I,J-2) = PRES(I,J-2) + FATOR*DIF1(I)
   62     DIF1(I) = DIF2(I); DIF2(I) = DIF
        7 CONTINUE
            DO 8 I=1,NNN
          PRES(I,M)=PRES(I,M)+DIF1(I)*FATOR
          PRES(I,MM)=PRES(I,MM)+DIF2(I)*FATOR
          DIF1(I)=0.0;DIF2(I)=0.0
       8  CONTINUE
          DO 9 I=2,NN
          PRES(I,1)=-PRES(I,2); PRES(I,MMM)=-PRES(I,MM)
        9 CONTINUE
          DO 10 J=2,MM
          PRES(1,J)=-PRES(2,J); PRES(NNN,J)=-PRES(NN,J)
     10   CONTINUE
          K=K+1; CONVG(K)=SOMA2/SOMA1
          IF((K<LIMITE).AND.(CONVG(K)>=EPSILON)) GO TO     6
          GO TO 1
          END
            SUBROUTINE ALTURA(*,*,*,XXX)
*****************************************************************
*****************************************************************
*****************************************************************
*****************************************************************
          COMMON/AREA2/H1,H2,CHAVE1,RSAPATA,X,X2,DELTAX,B/AREA6/H(32,32),
            1PIVOT,AA//M,MM,MMM,N,NN,NNN
          COMMON/AREA9/FOLGA,ORIGEM
          GO TO(1,2,3,4,5,6,7,8,9,10)CHAVE1 ;RETURN 2
   1        CONTINUE
          DO 11 J=1,MMM
          H(1,J)=(H1+(1.0-(FLOAT(J)-1.5)/M)*(H2-H1))/H1
          DO 11 I=2,NNN
   11     H(I,J)=H(1,J)
          RETURN 1
   2      CONTINUE
          DO 22 J=1,MMM
          H(1,J)=(H1+(1.0-(FLOAT(J)-1.5)/M)*(XXX-H1))/H1
          DO 22 I=2,NNN
   22     H(I,J)=H(1,J)
          RETURN 1
   3      CONTINUE; DARC= DELTA X*B/RSAPATA
          ORIGEM=ORIGEM-(PIVOT+0.5*DELTAX*B)/RSAPATA
          DO 33 J=1,MMM
            H(1,J) = FOLGA + XXX*COS(ORIGEM)
```

```
        H(1,J)=H(1,J)/B
        ORIGEM=ORIGEM + DARC
        DO 33 I=2,NN
33      H(I,J)=H(1,J)
          IF(H(1,1).LT.H(1,MMM)) RETURN 3
          RETURN 1
4       CONTINUE
          P = DECLIV

          DO 41 J=1,MMM; DO 41 I=1,NNN; H(I,J)=1.0
41        CONTINUE
          DO 44 J=1,DECLIV
          H(1,J)=(H1+(1.0-(FLOAT(J)-1.5)/P)*(H2-H1))/H1
          DO 44 I=2,NNN
44        H(I,J)=H(1,J)
          RETURN 1
5       CONTINUE
* PARA A ENTRADA DAS ALTURAS UMA A UMA POR CARTAO OS VALORES DEVEM SER
* DADOS EM MILESIMOS DE MILIMETROS EM FORMATO LIVRE
          J=1
51        READ(2,*,END=551)H(1,J)
          WRITE(3,*) H(1,J)
          H(1,J)=H(1,J)/1000/1000/H1 + 1.0
          DO 55 I=2,NNN
55        H(I,J)=H(1,J)
          J=J+1; GO TO 51
551       NT=MMM-J
          IF(NT-0)552,554,556
552       NT=NT+1;WRITE(3,553)NT
553       FORMAT(' FORAM DADOS'I2'-PONTOS A MAIS'); STOP
554       RETURN 1
556       NT=NT+1;WRITE(3,557) NT
557       FORMAT(' FALTAM 'I3' PONTOS'); STOP
6       CONTINUE
        DO 66 J=1,MMM
CARTAO A SER SUBSTITUIDO POR FORMULA PROPRIA DO USUARIO. SUBSTITUIR TAMBEM O
CARTAO (RETURN 2) POR UM CARTAO (RETURN 1). ESTA FORMULA CORRESPONDE A CHAVE1=6
        DO 66 I=2,NNN
66      H(I,J)=H(1,J): RETURN 2
7       CONTINUE
        DO 77 J=1,MMM
CARTAO A SER SUBSTITUIDO POR FORMULA PROPRIA DO USUARIO. SUBSTITUIR TAMBEM O
CARTAO (RETURN 2) POR UM CARTAO (RETURN 1). ESTA FORMULA CORRESPONDE A CHAVE1=7
        DO 77 I=2,NNN
77      H(I,J)=H(1,J)
        RETURN 2
8       CONTINUE
        DO 88 J=1,MMM
CARTAO A SER SUBSTITUIDO POR FORMULA PROPRIA DO USUARIO. SUBSTITUIR TAMBEM O
CARTAO (RETURN 2) POR UM CARTAO (RETURN 1). ESTA FORMULA CORRESPONDE A CHAVE1=8
        DO 88 I=2,NNN
88      H(I,J)=H(1,J); RETURN 2
9       CONTINUE
        DO 99 J=1,MMM
CARTAO A SER SUBSTITUIDO POR FORMULA PROPRIA DO USUARIO. SUBSTITUIR TAMBEM O
CARTAO (RETURN 2) POR UM CARTAO (RETURN 1). ESTA FORMULA CORRESPONDE A CHAVE1=9
        DO 99 I=2,NNN
99      H(I,J)=H(1,J);RETURN 2
10      CONTINUE
        DO 1010 J=1,MMM
```

```
CAPTAO A SER SUBSTITUIDO POR FORMULA PROPRIA DO USUARIO. SUBSTITUIR TAMBEM O
CARTAO (RETURN 2) POR UM CARTAO (RETURN 1). ESTA FORMULA CORRESPONDE A CHAVE1=10
       DO 1010 I=2,NNN
1010   H(I,J)=H(1,J)
       RETURN 2
       END
        SUBROUTINE FFORCA(*,*,DDC)
*****************************************************************
*****************************************************************
*****************************************************************
*****************************************************************
       DIMENSION H(32,32)
       COMMON/AREA3/FORCA,FORSA/AREA6/H,PIVOT,AA/AREA10/DECLIV
       IF(FORCA>FORSA)GO TO 1
       DECLIVE=DECLIVE-2*AA
         IF(DECLIV<=0.0)STOP' FOLGA INSUFICIENTE PARA A OTIMI
         1ZACAO DA SAPATA '
         FORSA=0.0
         IF(AA<(DDC+0.1E-6))RETURN 2
       AA=AA/2.5
       GO TO 2
1      FORSA=FORCA
2      DECLIVE=DECLIVE+AA
       RETURN 1
       END
        SUBROUTINE CENTRO(*,*,*,*,*,DDC,PRIME,CHAVE2,TIPO)
********************************************************************
********************************************************************
********************************************************************
********************************************************************
       COMMON/AREA6/H(32,32),PIVOT,AA/AREA10/DECLIVE
         COMMON/AREA4/TETABA,RET,FLAG1,FLAG2
         REAL K
         GO TO(11,12)FLAG1
11       IF (TETABARRA<PIVOT)FLAG2=2
         IF(TIPO==1)STOP' FOLGA INSUFICIENTE PARA ALCANCAR O PIVO DADO'
12       GO TO(1,2)FLAG2
1        IF(TETABARRA>PIVOT)GO TO 4
         GO TO 3
2        IF(TETABARRA<PIVOT)GO TO 4
3        FLAG1=2
         DECLIVE=DECLIVE-AA
       IF(AA<(DDC+0.1E-6))RETURN RET
       AA=AA/2
4        FLAG1=2
       DECLIVE=DECLIVE+ AA
       RETURN PRIME
       END
       SUBROUTINE FP(*)
********************************************************************
********************************************************************
********************************************************************
********************************************************************
       DIMENSION PRES(32,32), TEMP(32,32),VISC(32,32),H(32,32),R(32),
      1 POSICAO(20),U(32)
       COMMON/AREA1/PRES,TEMP,VISC,R,DF,DDR,DARC,VISK1,CONSTA,BETA,TETA
      1/AREA5/U,FLUX01,FLUX02,FLUXCL,EFECAT,DELTAT,TEMPME,VISCME,FLUXC,
      2 POTENC//M,MM,MMM,N,NN,NNN
         COMMON/AREA6/H,PIVOT,AA
       COMMON/AREA7/R2
```

```
      FLUXO 1=0.0; FLUXO 2=0.0; FLUXO 3=0.0; FLUXO 4=0.0
      PERDA 2=0.0; PERDA 3=0.0; PERDA 4=0.0
      DO 1 I=2,NN
      FLUXO 1=FLUXO 1-H(I)*(H(I,2)+H(I,1))/4+(H(I,2)+H(I,1))**3*PRES
     1 (I,2)/(48*VISC(I,2)*R(I)*DARC)
      FLUXO 2=FLUXO 2+H(I)*(H(I,MMM)+H(I,MM))/4+(H(I,MMM)+H(I,MM))**3
     1 *PRES(I,MM)/(48*VISC(I,MM)*R(I)*DARC)
1     PERDA 2=PERDA 2+FLUXO 2*(TEMP(I,MM)-TEMP(1,1))
      DO 2 J=2,MM
      FLUXO 3=FLUXO 3+(H(1,J)+H(2,J))^3*PRES(2,J)/(48*DR*R2*VISC(2,J))
      FLUXO 4=FLUXO 4+(H(NNN,J)+H(NN,J))^3*PRES(NN,J)/(48*DR*R2*
     1 VISC(NN,J))
      PERDA 3=PERDA 3+FLUXO 3*(TEMP(2,J)-TEMP(1,1))
2     PERDA 4=PERDA 4+FLUXO 4*(TEMP(NN,J)-TEMP(1,1))
      FLUXO L= ABS(FLUXO 3)+ABS(FLUXO 4)
      PERDA TOTAL = ABS(PERDA 2)+ABS(PERDA 3)+ABS(PERDA 4)
      TEMP MEDIA = 0.0; DO 3 I=2,NN; DO 3 J=2,MM
3     TEMP MEDIA=TEMP MEDIA + TEMP(I,J)
      TEMP MEDIA=TEMP MEDIA/(N*M);DELTAT=(TEMP(N,MM)+TEMP(2,MM))/2-TEMP(
     11,1)
      VISC MEDIA=CONSTANTE*EXP(BETA/(TEMP MEDIA + TETA))
      POTENCIA=POTENCIA+2*PERDAT;FLUXO=FLUXO+2*FLUXO1; RETURN 1
      END
```

APÊNDICE II

EQUAÇÃO DA ENERGIA |2|

Considere-se, dentro de um fluido em movimento, um volume infinitesimal $\Delta x.\Delta y.\Delta z$ chamado volume de controle, fixo no espaço, através do qual variam continuamente a velocidade, temperatura, pressão, densidade e viscosidade do óleo (Fig. 1). Um balanço energético neste volume pode ser escrito da seguinte forma :

$$E_s - E_e = W_{VF} - W_{VF} + E_a$$

onde

E_s é a energia transportada para fora do volume de controle ;

E_e é a energia transportada para dentro do volume de controle ;

W_{VF} é o trabalho realizado pela vizinhança do volume de controle sobre o fluido nele contido ;

W_{VF} é o trabalho realizado pelo fluido do volume de controle na sua vizinhança ;

E_a é a energia armazenada no volume durante o regime transiente.

No regime estacionário consideraremos apenas

$$E_s - E_s = W_{VF} - W_{VF} \qquad (1)$$

O mecanismo de transporte de energia para dentro e fora do volume será apenas a convecção da energia intrínseca (energia interna e energia cinética). Condução e radiação serão desprezadas. Assim, tem-se na direção x, uma entrada de energia

$$\rho Ue \; \Delta y \; \Delta z$$

onde ρ é a densidade do fluido, U a velocidade na direção x e e a energia intrínseca dada por

$$e = \frac{U^2 + V^2 + W^2}{2} + C_V T$$

A saída de energia na mesma direção será

$$\rho Ue \; \Delta y \; \Delta z + \frac{\partial (PUe)}{\partial x} \Delta x \; \Delta y \; \Delta z$$

tem-se então na direção x o seguinte balanço energético

$$(E_s - E_e)_x = \frac{\partial (Ue)}{\partial x} \Delta x \; \Delta y \; \Delta z$$

Considerando os três eixos

$$E_s - E_e = \left| \frac{\partial (\rho Ue)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho Ve)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho We)}{\partial z} \right| \Delta x \; \Delta y \; \Delta z$$

Na Fig. 1 está representado o volume de controle para visualização dos trabalhos realizados pelo fuido e sobre o fluido.

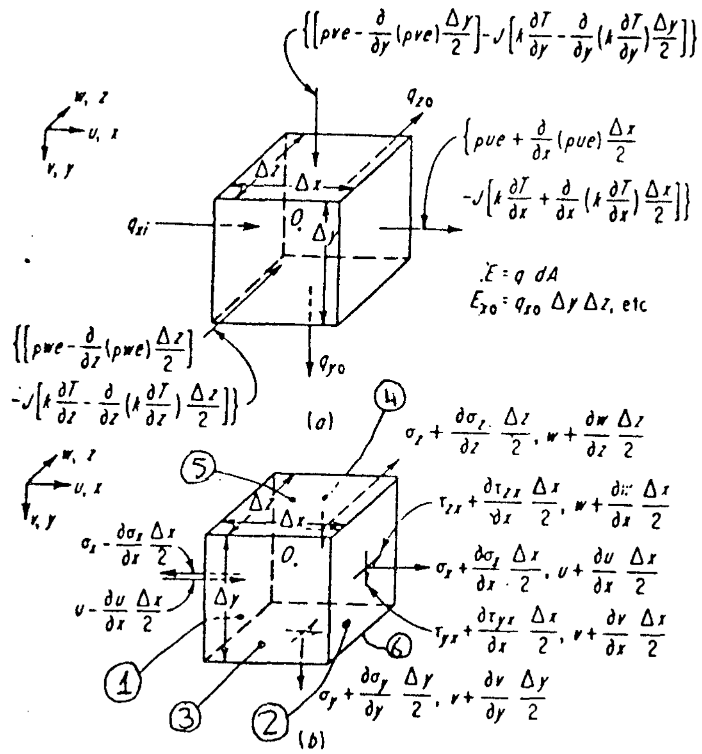


Fig. 1 - Volume de controle. (a) Energias transportadas.
(b) Energias mecânicas.

O trabalho é realizado pelo fluido nas superfícies 1, 2 e 3, onde as velocidades são no sentido oposto às tensões e, é realizado sobre o fluido nas superfícies 2, 4 e 6 do volume de controle. A variação do trabalho na direção x será

$$(W_{VF} - W_{FV})_x = (\tau x + \frac{\partial \tau x}{\partial x} \Delta x)\ \Delta y \Delta z\,(U + \frac{\partial U}{\partial x} \Delta x) + (\tau zx + \frac{\partial \tau zx}{\partial x})\,\Delta y \Delta z\,(W + \frac{\partial W}{\partial x}\ \Delta X\ )$$

$$(\tau yx + \frac{\partial \tau yx}{\partial x} \Delta x)\ \Delta y\ \Delta z\ (V + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x) - \tau x\ \Delta_y\ \Delta z\ U - \tau zx\ \Delta y\ \Delta z\ W - \tau yx\ \Delta y\ Z_z\ V$$

desprezando os termos de ordem superior, tais como

$$\frac{\partial U}{\partial x} \cdot \frac{\partial \tau x}{\partial x} \frac{\Delta x^2}{4}$$

obtemos

$$(W_{VF} - W_{FV})_x = \left[\frac{\partial}{\partial x} (U\tau x + V\tau yx + W\tau zx)\right] \Delta x\ \Delta y\ \Delta z$$

analogamente, para as direções y e z

$$(W_{VF} - W_{FV})_y = \left[\frac{\partial}{\partial y} (U\tau y + V\tau y + W\tau zy)\right] \Delta_x\ \Delta_y\ \Delta z$$

$$(W_{VF} - W_{FV})_z = \left[\frac{\partial}{\partial z} (U\tau xz + V\tau yz + W\tau z)\right] \Delta_x\ \Delta_y\ \Delta_z$$

substituindo $E_s - E_e$ e $W_{VF} - W_{FV}$ na equação (1)

$$\frac{\partial(\rho Ue)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho V e)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho We)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}(U\tau x + V\tau yx + W\tau xz)$$

$$+\frac{\partial}{\partial y}(U\tau xy + V\tau y + W\tau zy) + \frac{\partial}{\partial z}(U\tau xz + V\tau yz + W\tau z) \qquad (2)$$

De acordo com a posição do volume de controle entre as superfícies Fig.2, a expressão (2) deve ser integrada sobre a altura h (direção y) resultando

$$\int_0^h \left[\frac{\partial(\rho Ue)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho we)}{\partial z}\right]dy + \rho Ve \Big|_0^h = \int_0^h \left[\frac{\partial}{\partial x}(U\tau x + V\tau yx + W\tau zx) +\right.$$

$$\left.+\frac{\partial}{\partial x}(U\tau xz + V\tau yz + W\tau z)\right]dy + (U\tau xy + V\tau y + W\tau zy) \Big|_0^h \qquad (3)$$

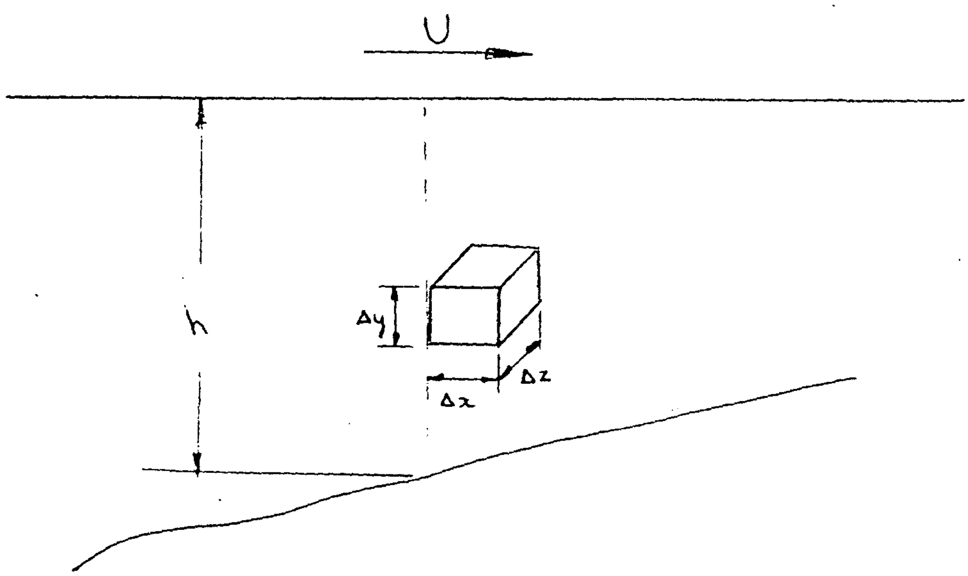


Fig. 2 - Posição do volume de controle no filme lubrificante

Em problemas de lubrificação se supõe que o fluido adere perfeitamente às superfícies, de modo que as velocidades na superfície estacionária são

$$U_h = V_h = W_h = 0$$

e na superfície em movimento são

$$V_o = W_o = 0 \; ; \; U_o = U$$

assim

$$\rho Ve_h = \rho Ve_o = 0$$

e

$$(U\tau xy + V\tau y + W\tau zy)_h = 0$$

$$(U\tau xy + V\tau y + W\tau zy)_o = U_{xy_o}$$

A substituição destes valores na forma integrada de equação 2 dará

$$\int_0^h \left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho Ue) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho We)\right] dy + \int_0^h \left[\frac{\partial}{\partial x}(U\tau x+V\tau yx +W\tau_{zx}) + \right.$$

$$\left. + \frac{\partial}{\partial z}(U\tau_{xz}+V\tau_{yz}+ W\tau z)\right] dy - U\tau xy\Big|_0 \qquad (4)$$

Desenvolvendo o integrando do segundo membro da equação acima

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(U\tau_x + V\partial_{yx} + W\partial_{zx}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(U\partial_{yz} + V\partial yz + W\tau z\right) = INT =$$

$$INT = U\frac{\partial \tau x}{\partial x} + \tau x\frac{\partial u}{\partial x} + V\frac{\partial yx}{\partial x} + \tau_{yx}\frac{\partial v}{\partial x} + W\frac{\partial \tau xz}{\partial x} + \tau_{xz}\frac{\partial W}{\partial x} +$$

$$+ U\frac{\partial xz}{\partial z} + \tau_{xz}\frac{\partial U}{\partial z} + V\frac{\partial \tau yz}{\partial z} + \tau_{yz}\frac{\partial V}{\partial x} + W\frac{\partial \tau z}{\partial z} + \tau z\frac{\partial w}{\partial z}$$

$$INT = U\left(\frac{\partial \tau x}{\partial x} + \frac{\partial \tau xz}{\partial z}\right) + V\left(\frac{\partial \tau yx}{\partial x} + \frac{\partial \tau yz}{\partial z}\right) + W\left(\frac{\partial \tau xz}{\partial x} + \frac{\partial \tau z}{\partial z}\right) +$$

$$+ \tau_x\frac{\partial U}{\partial x} + \tau_{yx}\frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{xz}\left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) + \tau_{yz}\frac{\partial v}{\partial z} + \tau_z\frac{\partial W}{\partial z}$$

somando e subtraindo

$$U\frac{\partial \tau zy}{\partial y} + V\frac{\partial \tau y}{\partial y} + W\frac{\partial \tau zy}{\partial y}$$

e agrupando os termos convenientemente

$$INT = U\left(\frac{\partial \tau x}{\partial x} + \frac{\partial \tau xy}{\partial y} + \frac{\partial \tau xz}{\partial z}\right) + V\left(\frac{\partial \tau yx}{\partial x} + \frac{\partial \tau y}{\partial y} + \frac{\partial \tau yz}{\partial z}\right) +$$

$$+ W\left(\frac{\partial \tau xz}{\partial x} + \frac{\partial \tau zy}{\partial y} + \frac{\partial \tau z}{\partial z}\right) + \tau_x \frac{\partial U}{\partial x} + \partial_{yx}\frac{\partial V}{\partial x} + \partial_{xz}\left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}\right) +$$

$$\partial_{yz}\frac{\partial V}{\partial z} + \tau_z \frac{\partial W}{\partial z} - \left(U \frac{\partial \tau xy}{\partial y} + V \frac{\partial \tau y}{\partial y} + W \frac{\partial \tau zy}{\partial y}\right)$$

Neste ponto serão feitas as seguintes substituições

$$\frac{\partial \sigma x}{\partial x} + \frac{\partial \tau xz}{\partial y} + \frac{\partial \tau xz}{\partial z} = \rho\left(U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial \tau yz}{\partial X} + \frac{\partial \sigma y}{\partial Y} + \frac{\partial \tau yz}{\partial Z} = \rho\left(U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z}\right) \qquad (5)$$

$$\frac{\partial \tau xz}{\partial x} + \frac{\partial \tau zy}{\partial y} + \frac{\partial \sigma z}{\partial z} = \rho\left(U \frac{\partial w}{\partial x} + V \frac{\partial w}{\partial y} + W \frac{\partial w}{\partial z}\right)$$

e

$$\partial_{xy} = \mu\left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}\right) \; ; \; \partial_{xz} = \mu\left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}\right) \; ; \; \tau_{yz} = \mu\left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y}\right).$$

$$\sigma_x = - p - \frac{2}{3}\theta + 2\mu \frac{\partial U}{\partial x} \; ; \; \sigma_y = - p - \frac{2}{3}\theta + 2\mu \frac{\partial V}{\partial y} \; ; \; \sigma_z = - p - \frac{2}{3}\theta + 2\mu \frac{\partial W}{\partial z}$$

onde

$$\theta = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z}$$

mas antes, notando que $h \ll B$, L, podemos tomar V, T, e μ como independentes de y, ou seja

$$\frac{\partial V}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \mu}{\partial y} = 0$$

o integrando (INT) e as substituições (5) ficaram na forma

$$INT = U\left(\frac{\partial \tau x}{\partial x} + \frac{\partial \tau xy}{\partial y} + \frac{\partial \tau xz}{\partial z}\right) + W\left(\frac{\partial \tau xz}{\partial x} + \frac{\partial \tau zy}{\partial y} + \frac{\partial \tau z}{\partial z}\right) +$$

$$+ \tau_x \frac{\partial U}{\partial x} + \tau_{xz}\left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}\right) + \tau_z \frac{\partial W}{\partial z} - \left(U \frac{\partial \tau xy}{\partial z}\right) + W \frac{\partial \tau zy}{\partial y}\Big) \qquad (6)$$

substituições

$$\frac{\partial \tau x}{\partial x} + \frac{\mu \tau xy}{\partial y} + \frac{\partial \tau xz}{\partial z} = \rho \left(U \frac{\partial U}{\partial x} + W \frac{\partial U}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial \tau xz}{\partial x} + \frac{\partial \tau zy}{\partial y} + \frac{\partial \tau z}{\partial z} = \rho \left(U \frac{\partial w}{\partial x} + W \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

e

$$\tau_{xy} = \mu \frac{\partial U}{\partial Y} \rightarrow \frac{\partial \tau xy}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \quad ; \quad \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad ;$$

$$\tau_{yz} = \mu \frac{\partial W}{\partial y} \rightarrow \frac{\partial \tau yz}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}$$

$$\sigma x = - P - \frac{2}{3} \theta + 2\mu \frac{\partial U}{\partial x} \quad ; \qquad (7)$$

$$\sigma_z = - P - \frac{2}{3} \theta + 2 \mu \frac{\partial W}{\partial z}$$

$$\theta = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z}$$

Substituindo (7) em (6) teremos

$$INT = \rho U \left(U \frac{\partial u}{\partial x} + W \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \rho W \left(U \frac{\partial w}{\partial x} + W \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \left(-p - \frac{2}{3}\theta + 2\mu \frac{\partial U}{\partial x} \right) \frac{\partial U}{\partial x} +$$

$$\mu \frac{\partial u}{\partial z} \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \left(- p - \frac{2}{3} \theta + 2\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \left(\mu U \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \mu W \frac{\partial W}{\partial y^2} \right)$$

que pode ser reagrupado na forma

$$INT = \rho U^2 \frac{\partial U}{\partial x} + \rho UW \frac{\partial U}{\partial z} + \rho UW \frac{\partial W}{\partial x} + \rho W^2 \frac{\partial W}{\partial Z} - p\left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial Z}\right) +$$

$$+ 2\mu\left[\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial Z}\right)^2\right] + \mu\left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x}\right)^2 - \left(\mu U \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \mu W \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}\right) -$$

$$- \frac{2}{3}\mu\left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial Z}\right)\frac{\partial U}{\partial x} + - \frac{2}{3}\mu\left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z}\right)\frac{\partial W}{\partial Z}$$

$$INT = \rho\left[U \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{U^2+W^2}{2}\right) + W \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{U^2+W^2}{2}\right)\right] - p\left(\frac{\alpha U}{\alpha x} \frac{\partial W}{\partial Z}\right) +$$

$$- \mu W \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = \mu U \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \phi$$

onde

$$\phi = \mu\left[2\left(\frac{\alpha U}{\alpha x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial W}{\partial Z}\right)^2 - \frac{2}{3}\left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial x}\right)^2\right]$$

voltando à equação (4) com a expressão obtida para o INTEGRANDO

$$\int_0^h \left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho U e) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w e)\right] dy = \int_0^h \rho\left[U \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{U^2 + W^2}{2}\right) +\right.$$

$$W \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{U^2 + W^2}{2}\right)\Big] dy + - \int_0^h P \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z}\right) dy - \mu \int_0^h \left(U \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial W}{\partial y^2}\right) dy$$

$$\int_0^h \phi \, dy - \mu U \frac{\partial U}{\partial y}\Big|_0 \qquad (.8)$$

Agora vamos desenvolver o primeiro membro desta equação da seguinte maneira

$$\int_0^h \left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho U e) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho W e)\right] dy = \int_0^h \Big\{ PU \frac{\partial e}{\partial x} + \rho w \frac{\partial e}{\partial z} +$$

$$e \left[\frac{\partial (PU)}{\partial x} \quad \frac{\partial (\rho W)}{\partial z}\right]\Big\} dy$$

A equação de continuidade com V=0 e $\frac{v}{y} = 0$ é

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho W)}{\partial z} = 0$$

Então

$$\int_0^h \left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho U e) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho W e)\right] dy = \int_0^h \left(\rho U \frac{\partial e}{\partial x} + \rho W \frac{\partial e}{\partial z}\right) dy$$

Mas, sendo $e = (U^2 + W^2)/2 + C_v T$

$$\int_0^h \left[\frac{\partial}{\partial}(\rho U e) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho W e)\right] dy = \int_0^h \rho\left[U\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{U^2+W^2}{2}\right) + W\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{U^2+W^2}{2}\right)\right] dy +$$

$$+ \int_0^h \rho\left[U\frac{\partial (C_v T)}{\partial x} + W\frac{\partial (C_v T)}{\partial z}\right] dy$$

Substituindo na equação (8)

$$\int_0^h \rho\left[U\frac{\partial C_v T}{\partial x} + W\frac{\partial C_v T}{\partial z}\right] dy = -P\int_0^h \left(\frac{\alpha u}{\alpha x} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) dy +$$

$$-\mu\int_0^h \left(U\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + W\frac{\partial^2 W}{\partial y^2}\right) dy - \mu U\left.\frac{\partial U}{\partial y}\right|_0 + \int_0^h \emptyset\, dy \qquad (9)$$

onde

$$\emptyset = \mu\left[2\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial W}{\partial z}\right) - \frac{2}{3}\left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial X}\right)^2\right]$$

(9a)

O primeiro membro desta equação representa a convecção da energia interna do fluido. O primeiro termo do segundo membro, representa o trabalho feito pelo fluido na sua expansão contra as pressões da vizinhança. A segunda integral é a energia gerada pelo cizalhamento do fluido no volume de controle. Ø é a razão de dissipação da energia cinética em calor. O próximo passo na redução da equação (9), é a eliminação dos termos insignifican tes. Um dos termos de expansão é por razão de continuidade

$$P \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \left(U \frac{P}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \right)$$

Assim, de acordo com acordo com a hipótese simplificativa d), relacionada no Capítulo I, página 03- que considera todas as variações de velocidades nas direções x e y desprezíveis - pode-se eliminar os termos de expansão e a razão de dissipação da energia cinética $\emptyset$. Substituindo as expressões de velocidade

$$U = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} (y^2 - yh) + U \left(1 - \frac{Y}{h} \right)$$

$$W = \frac{1}{2\,\mu} \frac{\partial P}{\partial Z} (y^2 - yh)$$

e integrando obtem-se

$$\left[\left(\frac{PUh}{2} - \frac{\rho\, h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) \frac{\partial C_v T}{\partial x} - \frac{\rho\, h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial Z} \frac{\partial C_v T}{\partial z} \right] \doteq$$

$$\frac{\mu U^2}{h} + \frac{h^3}{12\mu} \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 \right]$$

Considerando que a variação de temperatura nos mancais não é muito grande para afetar, substancialmente o calor específico do fluido, podemos considerá-lo constante e escrever a forma fanal da equação da energia para aplicação em mancais hidrodinâmicos.

$$\partial U \rho C_v h \left[\left(1 - \frac{h^2}{\partial \mu U} \frac{\partial P}{\partial x} \right) \frac{\partial T}{\partial X} - \frac{h^2}{\partial \mu U} \frac{\partial P}{\partial Z} \frac{\partial T}{\partial Z} \right] =$$

$$\frac{12 \mu U^2}{h} \left\{ 1 + \frac{h^4}{12 \mu^2 U^2} \left[\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)^2 \right] \right\}$$