

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CONTRIBUIÇÕES NA FABRICAÇÃO
DE MANCAIS AEROSTÁTICOS

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANTONIO SALVADOR DA ROCHA

FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO 1993

BIOGRAFIA DO AUTOR

Antonio Salvador da Rocha é professor da disciplina Produção Mecânica, do Curso Técnico de Mecânica da Escola Técnica Federal do Ceará, desde 1977, e professor da disciplina Processos de Fabricação Mecânica, do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Fortaleza, desde 1980,

É Técnico em Mecânica, pela Escola Técnica Federal do Ceará (1975), e graduado em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Ceará (1980). É Pós-Graduado, a nível de especialização, em Engenharia e Segurança do Trabalho, pela Universidade de Fortaleza (1981) e em Tecnologia Educacional para o Ensino Superior, pela Faculdade de Filosofia de Fortaleza (1981). É Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração Fabricação, pela Universidade Federal de Santa Catarina (1985).

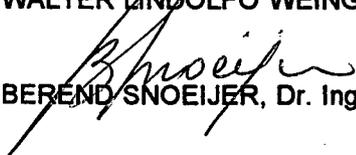
**CONTRIBUIÇÕES NA FABRICAÇÃO
DE MANCAIS AEROSTÁTICOS**

ANTONIO SALVADOR DA ROCHA

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO SÓLIDOS,
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA.**


Prof. WALTER LINDOLFO WEINGAERTNER, Dr. Ing. - Orientador

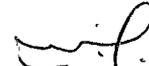

Prof. BEREND SNOEIJER, Dr. Ing. - Coordenador do CPGEM

BANCA EXAMINADORA


Prof. WALTER LINDOLFO WEINGAERTNER, Dr. Ing. - Presidente


Prof. LOURIVAL BOEHS, Dr. Eng.


Prof. ARMANDO ALBERTAZZI, Dr. Eng.


Prof. BENEDITO MORAES PURQUÉRIO, PhD.


Prof. BENEDITO DI GIACOMO, PhD.

DEDICATÓRIA

À Maria Lúcia, minha amada mulher, e aos meus queridos filhos, Mateus, Marina e Lucas, razão de ser do esforço desprendido.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner pela orientação deste trabalho e pela amizade consolidada.

Ao Prof. Benedito Purquério, PhD, da Escola de Engenharia de São Carlos-LAMAFE-USP, pelo material bibliográfico e informações técnicas fornecidas no início deste trabalho.

À Universidade de Fortaleza, pela viabilização deste trabalho.

À Escola Técnica Federal do Ceará pelo incentivo e apoio financeiro desprendido durante este trabalho.

À Coordenadoria de Apoio ao Pessoal Docente-CAPES, pelo apoio financeiro concedido pelo PICD.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico (CNPq) pelas bolsas de Iniciação Científica concedidas.

Aos M. Eng. Mec. Rolf Bertrand Schoeter, Rodrigo Lima Stoeterau, Rolando Vargas Vallejos, Juan Carlos Castillo, Moacir Eckhardt e Mazerly Gorges, pelas sugestões, auxílio e amizade prestados durante a realização desta Tese.

Às secretárias do L.M.P./UFSC Rosimar Franzoi e Lenice Grave pela incansável disponibilidade de colaboração.

Aos colegas de Pós-Graduação e professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, pelo incentivo e amizade.

Aos colegas professores da Universidade de Fortaleza e da Escola Técnica Federal do Ceará pelo apoio e incentivo.

Aos funcionários do L. M. P. e USIMAQ/UFSC : Antonio Duarte, Fernando, Hamilton, João batista, Joe, Lídio, Osvaldo,

Paulo, Renato, Sandro, Valtair e Zalmir, pelo auxílio técnico e amizade.

Aos bolsistas de Iniciação Científica: Luis Muller, Sérgio Daeoble, Paulo R. Blank, Luciano Moreira, Mário Alfeu, Mário Ferraz, Aluisio, Daniela, Manfred Molz, René Ross, Leonardo Oliveira, Ivo Luis, Hugo Vivanco, Miguel Anzolin, Vera Duarte, Lisiane Polli, e demais bolsistas do L.M.P., pelo auxílio e amizade.

À Verinha, secretária da CPGEM/UFSC, pelo incentivo e amizade.

À empresa DIAMANT PLASTICMETAL, pela doação da resina utilizada neste trabalho.

Aos meus pais, que, anos atrás, mostraram-me a luz no fim do túnel, e que possibilitaram minha caminhada até esta etapa de vida e trabalho.

A todos que direta ou indiretamente contibuiram para a realização deste trabalho.

INDICE

1. INTRODUÇÃO	01
2. ESTADO DA ARTE	05
2.1 Usinagem de Precisão e Ultraprecisão	05
2.2 Mancais para Árvores de Máquinas-Ferramentas de Ultraprecisão	10
2.2.1 Mancais com elementos rolantes	13
2.2.2 Mancais eletromagnéticos	15
2.2.3 Mancais fluidodinâmicos (hidrodinâmicos e aerodinâmicos)	17
2.2.4 Mancais fluidostáticos	18
2.3 Revisão Bibliográfica - Mancais Aerostáticos	23
2.3.1 Histórico	24
2.3.2 Princípio de operação do mancal aerostático	28
2.3.3 Tipos e formas de mancais aerostáticos	30
2.3.4 Tipos de restritores (métodos de compensação)	33
2.3.5 Aplicações de mancais aerostáticos	37
2.3.6 Instabilidade pneumática e escoamento supersônico	40
2.3.8 Parâmetros básicos de projeto	41
3. FABRICAÇÃO DE MANCAIS AEROSTÁTICOS SEMI-ESFÉRICOS	48
3.1 Fabricação de Mancais Aerostáticos Semi-Esféricos	48
3.1.1 Fabricação de um mancal semi-esférico/plano	55
3.1.2 Geração de semi-esferas em máquinas-ferramentas convencionais	57
3.1.3 Equipamentos para fabricação e	

análise experimental	73
3.1.4 Fabricação dos restritores de vazão por moldagem	82
3.1.5 Moldagem da calota semi-esférica e parte plana do mancal semi-esférico/plano	83
3.1.6 Obtenção da folga do mancal por lapidação	84
4. OTIMIZAÇÃO DE MANCAIS AEROSTÁTICOS RADIAIS PELO PROCESSO DE MOLDAGEM	86
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	92
5.1 Capacidade de carga dos mancais semi-esféricos/planos	92
5.2 Custos de Fabricação do Mancal Semi-Esférico/Plano	99
6. CONCLUSÕES	102
7. RECOMENDAÇÕES PARA NOVOS TRABALHOS	105
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
ANEXO 1 - EQUAÇÕES BÁSICAS PARA MANCAIS AEROSTÁTICOS	114
ANEXO 2 - METODOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DO MANCAL SEMI-ESFÉRICO	120
ANEXO 3 - PROJETO DE MANCAIS AEROSTÁTICOS RADIAIS	122
ANEXO 4 - PROJETO DE MANCAIS AEROSTÁTICOS AXIAIS	130
ANEXO 5 - MÁQUINAS-FERRAMENTAS DE PRECISÃO PARA FABRICAÇÃO DE SUPERFÍCIES ESFÉRICAS	135
ANEXO 6 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS EQUIPAMENTOS	141
ANEXO 7 - DESENHOS DO MANCAL SEMI-ESFÉRICO/PLANO	144

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Evolução histórica da precisão dimensional obtida por usinagem, segundo Tanigushi [4]	06
FIGURA 2	Mancais radiais para árvores de máquinas-ferramentas [7]	09
TABELA 1	Características operacionais de diversos tipos de mancais [7,8]	12
FIGURA 3	Tipos de mancais de elementos rolantes para árvores de máquinas-ferramentas [7]	13
FIGURA 4	Árvore de uma máquina-ferramenta com mancal eletromagnético e seus principais componentes [7]	16
FIGURA 5	Representação esquemática do princípio de formação de um filme fluido lubrificante em guias e mancais hidrodinâmicos	17
FIGURA 6	Configurações básicas para os mancais hidrostáticos planos e cilíndricos [7]	19
FIGURA 7	Mecanismo de operação dos mancais aerostáticos radiais e axiais [8]	29
FIGURA 8	Geometria dos mancais aerostáticos [8]	31
FIGURA 9	Carga em função da espessura do filme para um mancal aerostático axial [8].	34
FIGURA 10	Tipos de restritores de vazão para mancais aerostáticos [27]	35
FIGURA 11	Cabeçote de retificação com mancal aerostático [35]	38
FIGURA 12	Mancal aerostático semi-esférico/plano com acionamento por motor elétrico	45

FIGURA 13	Variação da rigidez e da vazão com a folga para mancais radiais [9]	48
FIGURA 14	Representação esquemática de mancais rotativos	51
FIGURA 15	Mancal semi-esférico/plano com estator moldado em resina	54
FIGURA 16	Geração de superfícies esféricas côncavas e convexas, por torneamento	59
FIGURA 17	Geração de superfícies esféricas côncavas e convexas, por fresamento	60
FIGURA 18	Fabricação da calota semi-esférica pelo processo de fresamento	61
FIGURA 19	Forma da superfície obtida devido a um deslocamento do eixo da ferramenta sobre o eixo y, no processo de fresamento.	62
FIGURA 20	Posição do centro da calota semi-esférica após um deslocamento da ferramenta na direção z, no fresamento	63
FIGURA 21	Riscos na superfície semi-esférica, devido aos erros de posicionamento na direção y	64
FIGURA 22	Fabricação do rotor semi-esférico pelo processo de torneamento.	65
FIGURA 23	Superfície obtida com deslocamento entre os eixos de giro, na direção do eixo x, no torneamento	67
FIGURA 24	Superfície obtida devido a um deslocamento na direção do eixo z, no torneamento	68
FIGURA 25	Superfície obtida devido a um erro de deslocamento na direção do eixo y, no	

	torneamento	69
FIGURA 26	Erro de forma em uma peça torneada com erro de ortogonalidade do movimento da ferramenta	71
FIGURA 27	Forma em uma superfície plana fresada com erro de ortogonalidade entre o eixo de giro da ferramenta e a superfície da mesa	72
FIGURA 28	Lapidador para superfícies planas	75
FIGURA 29	Representação esquemática do processo de lapidação para o rotor.	77
FIGURA 30	Sistema de purificação de ar para os mancais	79
FIGURA 31	Dispositivo para aplicação de forças, durante um ensaio de capacidade de carga	80
FIGURA 32	Bancada de ensaios para os mancais semi-esféricos/plano	81
FIGURA 33	Bancada de ensaios para mancais radiais.	87
FIGURA 34	Representação esquemática da montagem da luva aerostática	88
FIGURA 35	Luva aerostática radial, fabricada pelo processo de moldagem	89
FIGURA 36	Curvas deslocamento versus carga, para carga aplicada no lado esférico do mancal, com pressão de suprimento de 2, 3, 4 e 5 bar	92
FIGURA 37	Capacidade de carga do mancal semi-esférico/plano, para diversas pressões de suprimento, para carregamento no lado esférico.	94
FIGURA 38	Capacidade de carga do mancal semi-esférico/plano para diversas pressões de suprimento.	

	Carregamento no lado plano	95
FIGURA 39	Rigidez do mancal semi-esférico/plano para carregamento no lado esférico, com pressões de suprimento de 2, 3, 4 e 5 bar	97
FIGURA 40	Rigidez do mancal semi-esférico/plano, carregamento no lado plano, com pressões de suprimento de 2, 3, 4 e 5 bar	98
FIGURA 41	Sistema de referência utilizado na dedução da equação de Reynolds	115
FIGURA 42	Esquema de mancais axial e esférico, equivalentes, segundo Cardieri [41]	120
FIGURA 43	Variação da rigidez radial com a razão de pressão, variando somente a folga [72]	123
FIGURA 44	Estimativa da capacidade de carga e vazão em mancais radiais com duas carreiras de orifícios com rebaixo [72]	125
FIGURA 45	Determinação do diâmetro do orifício sem rebaixo em função da folga diametral para mancais aerostáticos radiais [72]	127
FIGURA 46	Variação do diâmetro do orifício sem rebaixo em função de vários parâmetros dos mancais radiais [72]	128
FIGURA 47	Estimativa da capacidade de carga e da vazão para mancais aerostáticos axiais com um anel de orifícios de alimentação [72]	130
FIGURA 48	Coefficiente de carga ótimo para mancais axiais, conforme Shires [72]	132
FIGURA 49	Determinação do diâmetro do orifício com	

	rebaixo em função da folga dos mancais aerostáticos axiais [72]	133
FIGURA 50	Variação do diâmetro ótimo do orifício com a pressão de alimentação e com o número de orifícios para mancais axiais anulares [72]	134
FIGURA 51	Representação esquemática de uma máquina com deslocamento "T"	135
FIGURA 52	Representação esquemática de uma máquina de contorno com deslocamento simultâneo	136
FIGURA 53	Representação esquemática de uma máquina de contorno polar "R - θ "	137
FIGURA 54	Representação esquemática de uma máquina geradora de arcos	138
FIGURA 55	Representação esquemática de uma fresadora de ultraprecisão	139
FIGURA 56	Torno de precisão para ferramenta de diamante	140

SIMBOLOGIA

A	Área de restrição do orifício	[mm ²]
A _a	Área do mancal axial	[mm ²]
A _e	Área do mancal esférico	[mm ²]
a	Largura; raio do mancal	[mm]
b	Largura; raio do mancal	[mm]
D _a	Diâmetro do anel para moldagem	[mm]
D _e	Diâmetro da semi-esfera	[mm]
D'	Diâmetro da semi-esfera	[mm]
D _f	Diâmetro de giro da ferramenta	[mm]
D _m	Diâmetro do macho, para moldar restritor	[mm]
d	Diâmetro do orifício	[mm]
F _c	Folga da calota, para moldagem	[mm]
h	Folga do mancal; espessura do filme lubrificante	[mm]
h _o	Folga do mancal; espessura do filme lubrificante	[mm]
K	Rigidez	[N/μm]
K _{go}	Coeficiente de pressão	
L	Comprimento	[mm]
L	Distância entre o centro do círculo descrito pela ferramenta e o centro da semi-esfera	[mm]
l	Comprimento	[mm]
M	Relação entre os diâmetros do mancal axial	
m	Vazão em massa através do mancal	[kg/s]
P	Pressão	[bar]
Pd1	Pressão	[bar]
Pd2	Pressão	[bar]
P _a	Pressão atmosférica	[bar]

P_f	Pressão na folga; no rebaixo	[bar]
P_o	Pressão de alimentação	[bar]
$P(\theta)$	Pressão absoluta do mancal esférico	[bar]
ppm	Parte por milhão	
Q	Vazão volumétrica	[m ³ /s]
R	Constante de gás	[Nm/kg °C]
R	Raio do mancal esférico	[mm]
R_e	Raio da semi-esfera	[mm]
R_a	Rugosidade média	[μm]
r, θ, ψ	Coordenadas esféricas	
T	Temperatura absoluta	[°K]
t	Tempo	[s]
u, v, w	Velocidades no sistema cartesiano	[m/s]
W	Carga; capacidade de carga	[N]
x, y, z	Coordenadas cartesianas	
x, y, z	Eixos da máquina-ferramenta	
δ	Profundidade do rebaixo	[mm]
Δh	Incremento de folga	[μm]
ΔW	Incremento de carga	[N]
Δx	Erro de posicionamento na direção x	[mm]
Δy	Erro de posicionamento na direção y	[mm]
Δz	Erro de posicionamento na direção z	[mm]
ϕ	Inclinação da curva carga x folga	[°]
μ	Viscosidade cinemática	[Ns/m ²]
ρ	Densidade do fluido	[kg/m ³]

RESUMO

Os mancais aerostáticos são elementos fundamentais para o desenvolvimento de árvores de máquinas-ferramentas de precisão.

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para a fabricação de mancais aerostáticos semi-esférico/plano, que suportam os carregamentos axiais e radiais, comuns nestas máquinas.

Os mancais são fabricados em tornos e fresadoras convencionais, minimizando-se os erros dimensionais, de forma e acabamento superficial, seguidos de um processo de lapidação, com ferramentas de baixo custo.

A metodologia consiste na obtenção do rotor semi-esférico com erros de esfericidade em torno de $1 \mu\text{m}$ e rugosidade R_a menor que $0,1 \mu\text{m}$, obtendo-se a calota semi-esférica através de moldagem com resina epóxi, usando o rotor como macho.

Os restritores de vazão podem ser confeccionados diretamente no corpo do mancal, durante o processo de moldagem, com diâmetros a partir de $0,1 \text{ mm}$, ou fabricados separadamente em bujões e inseridos nos mancais. A metodologia de moldagem foi aplicada na fabricação de mancais radiais com conicidade de $1:10.000$ apresentando bons resultados em termos de carga e rigidez.

Os protótipos foram utilizados em aplicações práticas, apresentando bons resultados.

Serão dadas informações sobre os procedimentos e os resultados obtidos.

ABSTRACT

Aerostatic bearings are basic elements for the development of spindles for precision machine tools.

This work presents a methodology for the manufacturing of spheric aerostatic bearings which support axial and radial loadings, very common in these machines.

The bearings are manufactured on conventional turning and milling machines, minimizing form errors and surface roughness, followed by a lapping process with low-cost tools.

The methodology makes possible to obtain the spheric rotor part with form accuracy of around $1 \mu\text{m}$ and surface roughness R_a lower than $0,1 \mu\text{m}$. The spheric stator part is moulded with epox resin against the rotor part.

The restrictors are manufactured directly in the bearing's body or through plugs with a diameter of around $0,2 \text{ mm}$. This methodology was tested in the manufacturing of 1:10000 conical radial bearings, wich presented good load and stiffness characteristics.

The prototypes have presented good results in some practical applications.

Information about the procedures and results obtained are given in the following work.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Atualmente existe uma preocupação mundial com a redução das reservas de matérias-primas, causadas principalmente pela produção em massa e alta taxa de desperdício na utilização dos produtos, gerando um nível de poluição preocupante. Este fato têm levado alguns países, como, por exemplo, o Japão, a repensar seus modelos produtivos, havendo uma tendência para a fabricação de pequenas quantidades de produtos, contanto que sejam de alta qualidade, e que sejam usados racionalmente [1].

Hoje, o padrão de vida de uma nação é estabelecido basicamente pela sua capacidade de projeto, fabricação e comercialização de produtos e serviços de qualidade, que satisfaçam as necessidades dos seus consumidores. O mercado consumidor é disputado por várias empresas, em muitos casos, de vários países, que necessitam invariavelmente fabricar produtos de qualidade, a baixo custo.

A indústria aeronáutica, aeroespacial, eletrônica, de periféricos da computação, da automação e da instrumentação, exige componentes mecânicos só possíveis de serem projetados e fabricados com a utilização de tecnologias requintadas.

O dinâmico desenvolvimento tecnológico dos últimos anos, nas diversas áreas da Engenharia, requer componentes e/ou sistemas mecânicos com requisitos de qualidade, desempenho e automatismo, cada vez maiores. E embora estes componentes continuem sendo gerados, basicamente, pelos processos de

fabricação convencionais, tais como: torneamento, fresamento, retificação, polimento, estampagem, fundição, etc., é necessário o domínio total dos processos de fabricação, uma vez que o número de variáveis que influem na qualidade do produto, cresce exponencialmente com o aumento das exigências de qualidade do componente fabricado [2].

Este conjunto de tecnologias, em constante aprimoramento, requer maior preocupação com o projeto, fabricação e qualificação de componentes e/ou sistemas mecânicos. Estes por sua vez têm tolerâncias de fabricação, referentes à dimensão, forma, localização, posicionamento, movimento e acabamento cada vez menores. As tolerâncias dimensionais, as exigências à rugosidade, os efeitos de deformação na usinagem, a forma geométrica, a composição e tratamentos térmicos da matéria-prima exigem técnicas especiais de fabricação, medição e manipulação.

Constata-se, na observação dos desenvolvimentos de vários países na Europa, América e Ásia, que a simples importação destas tecnologias avançadas não é suficiente para capacitar um país a enfrentar o desenvolvimento internacional. Muitas vezes a importação de uma tecnologia é indispensável, mas associando-se estes conhecimentos adquiridos com a cooperação internacional, unidas à pesquisa doméstica, pode-se chegar à utilização econômica de tecnologias convencionais ou novas, que garantam a fabricação sem perturbações, com alta repetibilidade.

Neste contexto, no final da década de 80, o Ministério da Ciência e Tecnologia do Brasil estabeleceu a Mecânica de Precisão como área estratégica para o desenvolvimento do país, tendo coordenado, a partir de então, simpósios e seminários para

estudar o assunto e traçar diretrizes para o setor.

Num estudo realizado pelo Centro Regional de Tecnologia e Informática - CERTI-SC [3], verificou-se que as técnicas para o projeto, fabricação, montagem e qualificação utilizados pela indústria brasileira são baseadas em tecnologias e equipamentos vindos do exterior, tendo-se dificuldades em sua aplicação e desenvolvimento. Constataram-se ainda limitações na fabricação de componentes com pequenas faixas de tolerâncias dimensionais ou com acabamento esmerado, uma vez que as máquinas-ferramentas e equipamentos existentes não atingem os níveis de precisão requeridos. Foram constatadas ainda carência de mão-de-obra especializada, insuficiência de informações, etc.

Algumas universidades brasileiras e centros de pesquisa, como a Escola de Engenharia de São Carlos-USP, Universidade de Campinas-Unicamp, Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT, Centro de Tecnologia Aeronáutica/Instituto de Estudos Avançados e Universidade Federal de Santa Catarina, têm desenvolvido trabalhos visando a contribuir com o projeto e fabricação de máquinas-ferramentas de precisão e de ultraprecisão, mas alguns componentes básicos, como guias lineares e mancais aerostáticos, na maioria das vezes, ainda são importados.

Considerando-se a escassez de capital e as dificuldades do Brasil para importar alta tecnologia, uma vez que esta muitas vezes é considerada de uso estratégico pelos países detentores, fica evidente a importância de desenvolver-se tecnologias na área da Fabricação de Precisão, as quais, além de atenderem às solicitações anteriormente citadas, favorecerão intensamente a

indústria nacional, propiciando uma produção de alta qualidade.

Com o objetivo de participar do esforço de dotar o Brasil de tecnologia nesta área, foi criada, no Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina, uma linha de pesquisa para projeto e fabricação de componentes de máquinas-ferramentas e instrumentos de precisão e ultraprecisão.

Com base nesta iniciativa, o presente trabalho visa a estabelecer uma metodologia para a fabricação de mancais aerostáticos utilizados nas árvores e guias lineares de máquinas-ferramentas de precisão e ultraprecisão. Mas, limita-se à fabricação de guias lineares e mancais rotativos, apresentando os processos tradicionais de fabricação e dando-se destaque a um novo processo de fabricação por moldagem, que está sendo desenvolvido no Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina. Este processo possibilita a fabricação dos mancais com os requisitos de qualidade exigidos e a baixo custo.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1 Usinagem de Precisão e Ultraprecisão

Os institutos de pesquisas de universidades européias, americanas e japonesas vêm desenvolvendo a tecnologia de fabricação, de projeto e construção de máquinas-ferramentas desde o fim do século passado. Isto permitiu que os processos convencionais de fabricação e as limitações tecnológicas fossem amplamente estudadas, fazendo com que o desenvolvimento de novas tecnologias para a fabricação de componentes específicos, ou para a usinagem e o beneficiamento de novos materiais, fossem consequência de uma evolução natural.

É nítido um direcionamento mundial para a inovação tecnológica, a automação, o aumento da velocidade de produção, desenvolvimento de sensores, e outras ações que possam tornar a produção mais econômica e de melhor qualidade.

Observa-se um crescimento de qualidade e redução dos limites de tolerâncias de produtos fabricados, decorrentes principalmente da evolução no projeto das máquinas-ferramentas e de seus elementos, bem como da integração destas com sistemas eletrônicos de controle e comando. Consequentemente a terminologia clássica de fabricação e fabricação de precisão teve que ser revista e ampliada. É usual empregar-se o termo Fabricação de Ultraprecisão quando se utilizam as máquinas-ferramentas que trabalham no domínio do limite

tecnológico da fabricação de precisão. Verifica-se que os limites dimensionais e/ou de tolerâncias são variáveis ao longo do tempo, dependentes do contínuo aperfeiçoamento dos meios de produção.

Tanigushi [4] estabeleceu os limites tecnológicos de fabricação segundo os critérios: normal, precisão e ultraprecisão em função do tempo para o século XX, conforme mostrados na figura 1. A usinagem convencional de hoje, com precisão dimensional da ordem de $1 \mu\text{m}$, era considerada usinagem de ultraprecisão na década de 40. As tolerâncias dimensionais projetadas por Tanigushi para a usinagem de ultraprecisão atingem o nível da distância interatômica para o ano 2020.

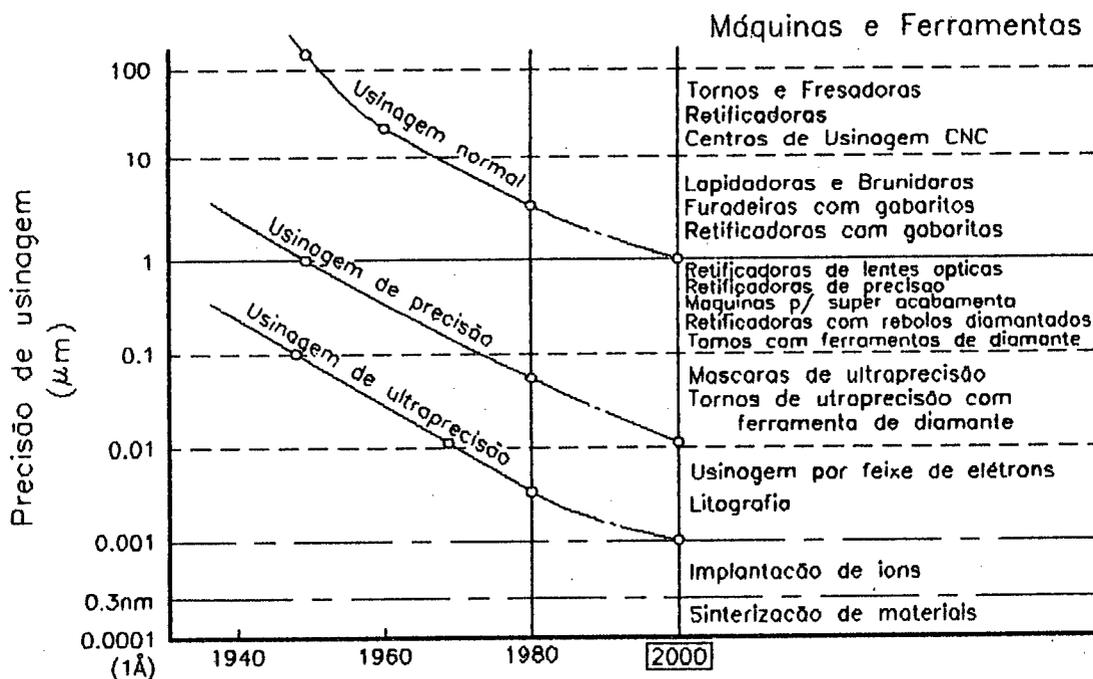


FIGURA 1 - Evolução histórica da precisão dimensional obtida por usinagem, segundo Tanigushi [4].

A precisão dimensional não é o único parâmetro que determina se a usinagem é de precisão ou de ultraprecisão. É necessário considerar também a precisão de forma e, principalmente, a qualidade superficial como o parâmetro que define a usinagem de ultraprecisão. Assim, temos peças hoje consideradas de precisão, com rugosidades Ra na faixa $0,01 \mu\text{m}$, enquanto nas de ultraprecisão se atingem valores $Ra < 1 \text{ nm}$ [5,6].

Embora a concepção básica das máquinas-ferramentas de precisão e ultraprecisão seja a mesma das máquinas-ferramentas convencionais, seus componentes apresentam características específicas, como:

- base superdimensionada em termos de rigidez, com elevada estabilidade térmica e mecânica, normalmente de granito, para minimizar os efeitos térmicos e absorção de vibrações;

- sistema de acionamento integrado;

- sistema de posicionamento para peça/ferramenta;

- sistema de avanço sub-micrométrico;

- sistema para isolar vibrações;

- ferramentas de diamante e CBN, para possibilitar um corte de pequena profundidade e pequeno avanço com altas velocidades de corte;

- normalmente mancais aerostáticos, para prover a suavidade de movimento, concentricidade e altas velocidades exigidas;

O desempenho de máquinas-ferramentas de precisão e de ultraprecisão depende fundamentalmente dos elementos que a constituem, tais como: base, guias, sistema de acionamento, sistema de avanço, sistema de posicionamento, juntas,

acoplamentos, mancais e árvore de trabalho [7].

Principalmente em operações de usinagem de ultraprecisão (em máquinas-ferramentas) todas as perturbações internas ou externas ao processo são refletidas na superfície da peça trabalhada, alterando sua qualidade. Além disto, os erros de deslocamento e vibrações da peça ou da ferramenta de corte induzem a erros de forma, de planicidade e de circularidade, e levam a um aumento da rugosidade das peças usinadas.

Dentre os elementos determinantes da qualidade de uma máquina-ferramenta de ultraprecisão destacam-se, as guias lineares e a árvore de trabalho.

Vários tipos de mancais podem ser utilizados em máquinas-ferramentas para proporcionar as propriedades mecânicas do sistema, principalmente a capacidade de carga, a rigidez e precisão de giro da árvore e movimento da ferramenta ou da peça, quando se aplicam cargas estáticas ou dinâmicas, tais como: mancais de elementos rolantes, hidrostáticos, hidrodinâmicos, aerostáticos e magnéticos. O comportamento mecânico e térmico destes diferentes tipos de mancais determinará a qualidade da peça trabalhada.

A figura 2 mostra diversos tipos de mancais radiais para árvores de máquinas-ferramentas [7].

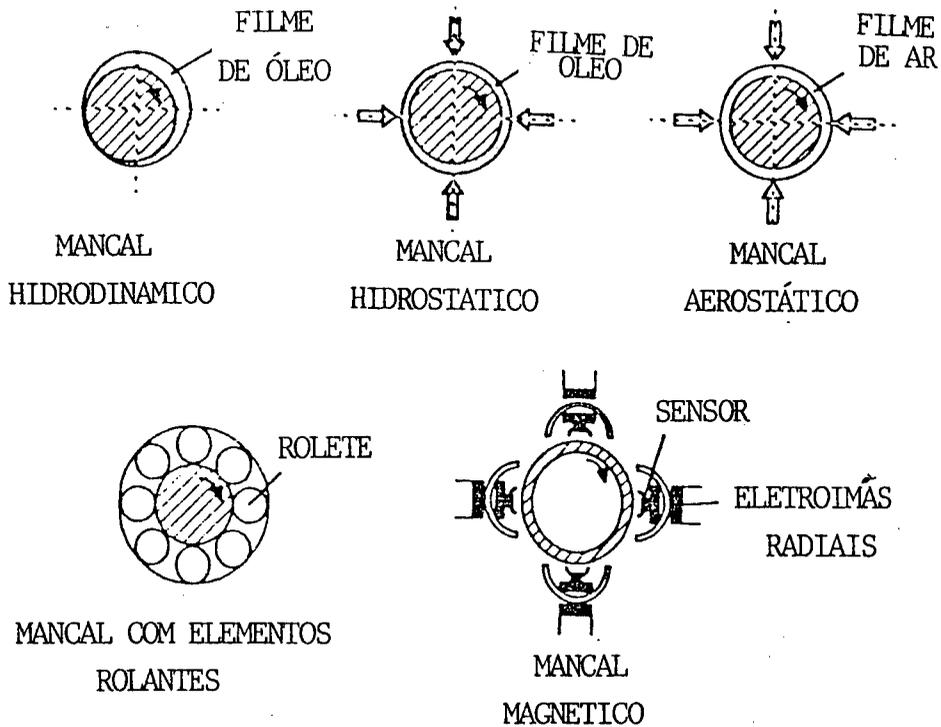


FIGURA 2 - Mancais radiais para árvores de máquinas-ferramentas [7].

A seguir, apresentam-se estes tipos de mancais utilizados nas máquinas-ferramentas de precisão e ultraprecisão, descrevendo-se o funcionamento, características e peculiaridades do ponto de vista de sua fabricação.

2.2 Mancais para Árvores de Máquinas-Ferramentas de Ultraprecisão

A qualidade de um sistema microtécnico depende fundamentalmente de sua rigidez que, por sua vez, é o resultado do somatório da rigidez de cada um de seus componentes, tais como: estrutura, mecanismo de acionamento, juntas, acoplamentos, eixos e mancais.

Dentre estes componentes, podemos destacar os mancais e as guias, pela importância dos mesmos como fatores determinantes da qualidade, uma vez que eles são os principais responsáveis pela precisão de giro, pela repetibilidade de movimento, pela capacidade de carga e rigidez dos componentes [7,8].

Os rigorosos requisitos relativos à precisão operacional de uma máquina-ferramenta devem ser confrontados com os requisitos que os mancais dessa máquina possam satisfazer. É difícil eliminar completamente os erros dinâmicos do sistema árvore-acionamento, mas uma árvore rígida, com movimento repetitivo e de funcionamento suave é básico para obter uma usinagem de precisão ou de ultraprecisão.

A árvore de uma máquina-ferramenta é suportada por mancais que se constituem no elemento chave para a precisão de giro e repetibilidade de movimento. As deformações devem ser mínimas, mesmo quando são aplicadas cargas estáticas, dinâmicas e térmicas.

No mancal para a árvore de uma máquina-ferramenta de precisão ou de ultraprecisão as exigências de manutenção da posição no espaço são ainda maiores, mesmo em elevada velocidade rotacional.

Em aplicações práticas, o eixo de uma árvore muda constantemente sua posição em relação a um sistema de coordenadas fixo, uma vez que as propriedades estáticas, dinâmicas, geométricas e térmicas da árvore são interdependentes, e variam com as cargas aplicados.

A relação entre a carga aplicada e deslocamento do eixo da árvore é definida como a rigidez da árvore. Em mancais hidrostáticos e aerostáticos a rigidez do mancal é definida como a relação entre a variação da carga e a variação da espessura do filme lubrificante. A rigidez de um mancal é variável, obtendo-se os melhores resultados quando se trabalha na faixa de máxima rigidez, ou seja, na faixa onde as variações da carga aplicada sobre o mancal provocam o mínimo deslocamento. Os deslocamentos admissíveis do mancal irão determinar a carga máxima que poderá ser aplicada sobre o mesmo, bem como o seu ponto de funcionamento ótimo.

Existem vários tipos de mancais com diferentes características de projeto, fabricação e funcionamento, de modo que para a seleção do melhor mancal deve-se comparar os seus fatores operacionais, tendo em vista aqueles que apresentem melhor desempenho, principalmente quanto à capacidade de carga, rigidez e perdas por atrito, quando confrontados com a capacidade de fabricação disponível, a disponibilidade de espaço e o custo do mancal.

A tabela 1 [7,8] apresenta as características dos principais tipos de mancais, podendo ser usada como referência inicial para seleção dos mesmos.

CARAC- TERÍSTICA OPERACIONAL	TIPO DE MANCAL		DE FLUIDOS PRESSURIZADOS		COM ELEMENTO FLEXIVEL	MAGNETICOS
	DE CONTATO		OLEO	AR		
	DESILIZANTES	COM ELEMENTOS ROLANTES				
RIGIDEZ	ALTA	MODERADA	ALTA	MODERADA	BAIXA A MODERADA	BAIXA A MODERADA
AMORTECIMENTO	ALTO	BAIXO	ALTO	BAIXO	BAIXO	BAIXO A MODERADO
CAPACIDADE DE CARGA	ALTA	MODERADA	ALTA	BAIXA	BAIXA A ALTA	BAIXA A ALTA
CONTROLE DA PAR- TIDA E DA PARADA	DIFICIL	FACIL	FACIL	FACIL	FACIL	FACIL
ATRITO ESTÁTICO	ELEVADO	BAIXO	ZERO	ZERO	ZERO	ZERO
MOVIMENTO SILENCIOSO	REGULAR	BOM	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE	EXCELENTE
PRECISAO DE POSICIONAMENTO	REGULAR	BOA	MUITO ELEVADA	MUITO ELEVADA	MUITO ELEVADA	MUITO ELEVADA
COMPONENTES PADRONIZADOS	NORMALMENTE NAO MODULAR	NORMALMENTE MODULAR	COMBIN. MODU- LAR/NAO MOD.	COMBIN. MODU- LAR/NAO MOD.	COMBIN. MODU- LAR/NAO MOD.	NAO MODULAR
CUSTO	BAIXO	BARATO	MODERADO	MODERADO	BAIXO	MUITO ELEVADO
BAIXA VELOCIDADE	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	EXCELENTE
ALTA VELOCIDADE	DEFICIENTE	REGULAR	BOM	EXCELENTE	BOM	BOM
FACILIDADE DE PROJETO	FACIL PROJETO	REGULAR	BOA	BOA	BOA	DIFICIL
ANALISE CINEMATICA	DIFICIL ANAL. NAO CINEMAT.	DIFICIL ANAL. NAO CINEMAT.	FACIL	DIFICIL	FACIL	DIFICIL
ALTA TEMPERATURA	BOM	REGULAR	BOM	EXCELENTE	SENSIVEL TERNICAMENTE	INSENS. TERN. GERA + CALOR
BAIXA TEMPERATURA	BOM	BOM	BOM	BOM	BOM	BOM
VIDA	BAIXA	REGULAR	BOA	EXCELENTE	BOA	EXCELENTE
SEVERIDADE DO AMBIENTE	TOLERA	INTOLERAVEIS	NAO PODE TER IMP. NO SIST.	NAO PODE TER IMP. NO SISTEM.	PERMITIDO	PERMITIDO
UNIDADE	REGULAR	BOM	BOM	BOM	BOM	SENSIVEL
PRE-CARGA	FACILMENTE PERDIDA	POUCA/FACIL DE PERDER	MANTIDA	MANTIDA	NAO REQUER	REQUER

TABELA 1 - Características operacionais de diversos tipos de mancais [7,8].

2.2.1 Mancais com elementos rolantes

Nos mancais com elementos rolantes, as superfícies com movimento relativo são separadas por elementos rolantes que podem ser esféricos, cilíndricos, em forma de barril ou de agulha, como representado esquematicamente na figura 3 [7].

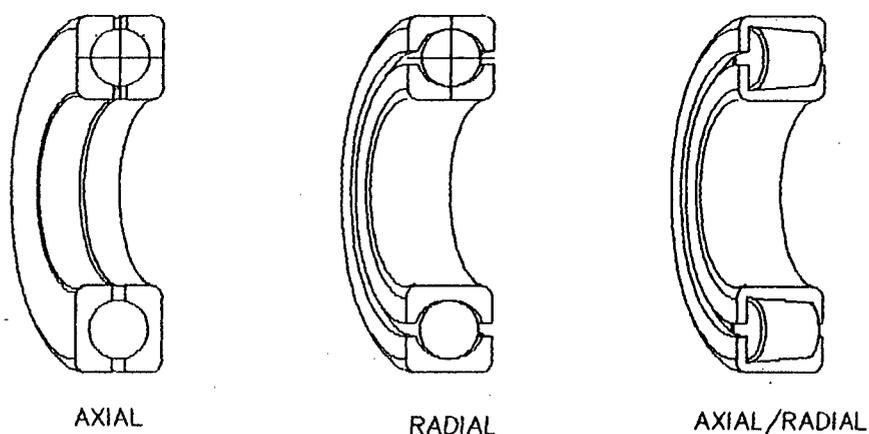


FIGURA 3 - Tipos de mancais de elementos rolantes para árvores de máquinas-ferramentas [7].

Estes mancais são relativamente compactos, podem suportar cargas pesadas, são facilmente instalados, mantidos e repostos.

Atualmente, árvores com mancais de elementos rolantes são largamente utilizadas em máquinas-ferramentas convencionais, sendo que sua principal vantagem está na padronização internacional e na relativa simplicidade para o cálculo aplicativo, bem como a seleção destes mancais.

Os mancais de rolamento são fabricados e selecionados segundo classes de precisão. Mesmo para as classes de precisão de giro mais elevadas não se consegue uma fidelidade de giro absoluta. Este erro é devido à imprecisão de fabricação dos casquilhos e das esferas dos rolamentos, que apresentam variações dimensionais e de forma e decorrente de erros de montagem dos rolamentos nos componentes, principalmente, quando se necessita de uma montagem perpendicular sobre o eixo. Em consequência, têm-se trajetórias não circulares, que podem levar à ruptura do filme lubrificante e a flutuações complementares da posição do eixo de rotação.

O erro de circularidade em máquinas-ferramentas, dotadas de árvores com mancais com elementos de rolamento normalmente situa-se na faixa de 2 a 5 μm para "árvores de precisão" e de 1 a 3 μm para "árvores de alta precisão" [7].

Quando se exigem características extremas de funcionamento a utilização de mancais de rolamentos se torna impraticável economicamente.

2.2.2 Mancais eletromagnéticos

No caso de mancais eletromagnéticos, o eixo da árvore é suportado por campos magnéticos causados pela atração ou repulsão mútua entre polos magnéticos.

É possível obter-se grandes folgas de trabalho, usualmente de 0,3 a 1 mm, resultando em baixo atrito na folga do mancal, uma vez que não há contato entre o rotor e o estator. Estes mancais possuem excelente rigidez, e podem ser aplicados em árvores que podem atingir rotações em torno de 100.000 min^{-1} e erros de batimento na faixa de $0,05 \mu\text{m}$.

Nos mancais magnéticos, são geradas forças eletromagnéticas entre o campo eletromagnético das bobinas e o rotor, sendo este mantido na posição centrada em relação ao estator através de bobinas eletromagnéticas servo controladas. O mancal eletromagnético exige um sistema de controle sofisticado e muito rápido para controlar a rigidez e o amortecimento do mancal. Um sensor de posição mede continuamente a folga entre o rotor e estator, enviando a informação para o controlador. Qualquer deslocamento do centro de rotação gera mudanças nas correntes e conseqüentemente das forças eletromagnéticas.

Para a proteção do mancal contra sobrecargas ou falhas eletrônicas, eles são montados sobre mancais de rolamento auxiliares, com uma folga igual à metade da folga do mancal eletromagnético.

Nestes mancais há grande geração de calor, em conseqüência dos fluxos eletromagnéticos, exigindo uma refrigeração externa. Apresentam dificuldades no projeto,

principalmente para o dimensionamento dos sensores e controladores, e possuem um custo elevado.

A figura 4 mostra uma árvore de máquina-ferramenta construída com mancal eletromagnético, mostrando seus principais componentes.

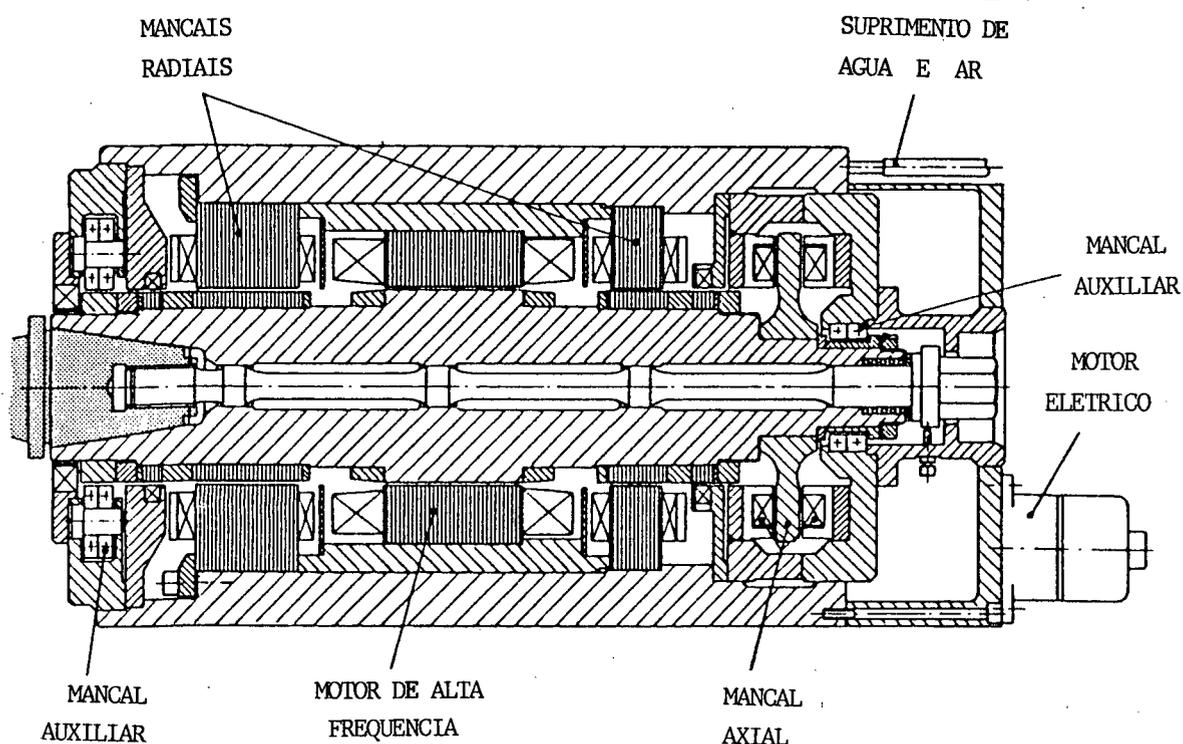


FIGURA 4 - Árvore de uma máquina-ferramenta com mancal eletromagnético e seus principais componentes [7].

2.2.3 Mancais fluidodinâmicos (hidrodinâmicos e aerodinâmicos)

Em mancais fluidodinâmicos as superfícies em movimento relativo são separadas por um filme de fluido que é arrastado para dentro da fenda de separação pelo próprio movimento, gerando uma pressão no filme de fluido, causada pelo movimento relativo entre as duas superfícies. Isto resulta numa fenda dependente da velocidade relativa e do carregamento do eixo conforme ilustrado na figura 5 [8,9].

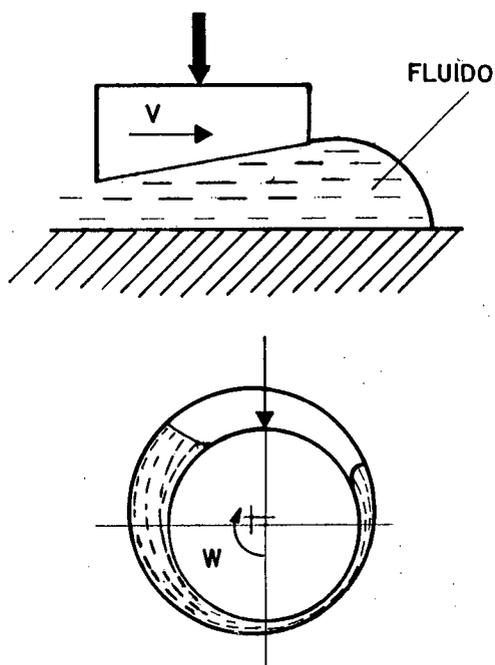


FIGURA 5 - Representação esquemática do princípio de formação de um filme fluido lubrificante em guias e mancais hidrodinâmicos.

A quantidade de calor gerada em um mancal fluidodinâmico aumenta com a viscosidade do fluido empregado, trazendo problemas de aquecimento ao sistema, principalmente quando este opera em elevada velocidade relativa. Devido ao atrito viscoso do óleo há geração de calor nos mancais hidrodinâmicos, prejudicando sua utilização em máquinas-ferramentas de ultraprecisão.

A usinagem de peças de alta precisão exigindo diferentes velocidades rotacionais em árvores com mancais hidrodinâmicos é difícil, uma vez que a árvore muda sua posição em dependência da velocidade rotacional.

No mancal aerodinâmico o fluido empregado é o ar, e o funcionamento é semelhante ao do hidrodinâmico. Estes mancais exigem alta precisão de fabricação e possuem baixa capacidade de carga. Esta é proporcional à viscosidade do lubrificante que, para o ar é de 100 a 1000 vezes menor que a do óleo. Suas aplicações limitam-se a giroscópios, na engenharia nuclear, em vídeo-cassetes, na ópto-eletrônica, em sistemas de varredura de impressoras a laser e máquinas de copiar [9].

2.2.4 Mancais fluidostáticos

Num mancal fluidostático as superfícies em movimento, assim como nos mancais fluidodinâmicos, são separadas por um filme fluido. Neste caso, o campo de pressão é formado na folga do mancal devido ao fluido alimentado sob pressão por uma bomba externa. A parte móvel fica suspensa neste campo de pressão e sua posição é quase independente da velocidade relativa.

Os mancais fluidostáticos são divididos em mancais hidrostáticos, onde o fluido lubrificante é um líquido considerado incompressível, normalmente o óleo, e os aerostáticos, que trabalham com um fluido gasoso compressível, normalmente o ar.

Existe uma variedade de configurações para mancais hidrostáticos, que diferem na forma e no sistema de alimentação do óleo, como mostrado na figura 6 [7].

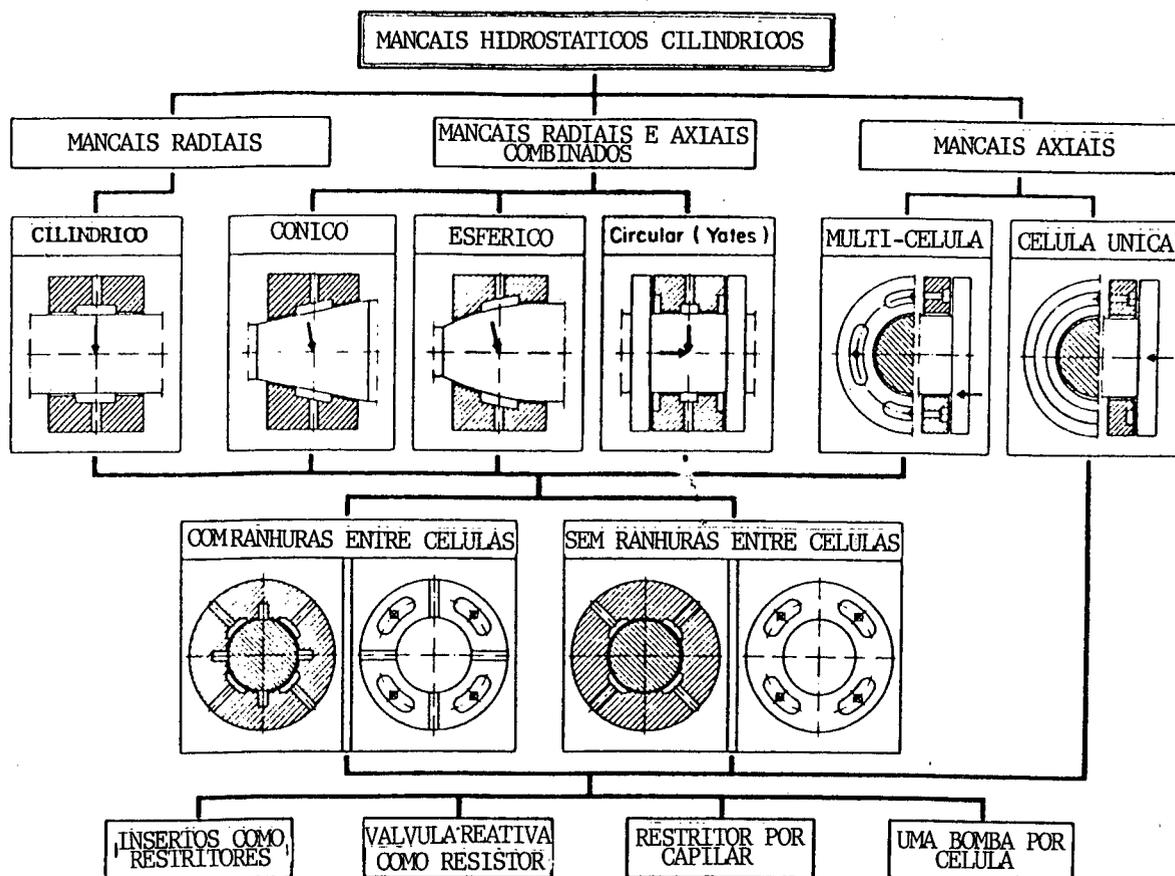


FIGURA 6 - Configurações básicas para os mancais hidrostáticos planos e cilíndricos [7].

Devido à característica de elevada rigidez e suavidade de movimento e ampla liberdade de projeto, os mancais hidrostáticos têm uma larga faixa de aplicações em máquinas-ferramentas convencionais e de precisão.

O desenvolvimento de mancais e guias hidrostáticos continua evoluindo e recentemente Slocum [10] patenteou um sistema de guias lineares com lubrificação hidrostática com autocompensação da folga.

O sistema de suprimento de óleo pode ser feito com uma única bomba alimentando vários restritores ou uma bomba por célula, que apresenta maior rigidez e maior capacidade de carga, mas tem um custo muito elevado.

Com o aumento da velocidade relativa aumenta a geração de calor no mancal. Para fluidos com elevada viscosidade, como os óleos, a vazão do fluido é insuficiente para transportar o calor gerado para fora da fenda do mancal, de forma que para se conseguir uma estabilização do sistema se faz necessária uma refrigeração complementar. Quando os requisitos são extremos, esta refrigeração pode ser obtida pelo uso de tubos de calor, diretamente instalados no mancal.

A variação da temperatura do líquido lubrificante leva a uma variação da viscosidade do mesmo, refletindo diretamente sobre a característica de funcionamento do mancal.

Estas duas limitações tem restringido as aplicações dos mancais hidrostáticos à velocidades relativamente baixas.

Um problema técnico complementar no uso de mancais hidrostáticos é causado pela necessidade da coleta do óleo no mancal, para realimentá-lo no sistema. Isto exige filtros

maiores, uma vez que se corre o risco de contaminação do óleo.

Os mancais aerostáticos trabalham de forma similar aos hidrostáticos, sendo o ar pressurizado externamente e alimentado para dentro da folga do mancal. As diferenças entre os dois dizem respeito principalmente às propriedades de seus lubrificantes. A viscosidade do ar é menor que a viscosidade do óleo, sendo praticamente independente da temperatura. Isto requer folgas muito pequenas para prover alta capacidade de carga e alta rigidez. Conseqüentemente, aumentam as dificuldades e custos de fabricação.

As perdas por atrito nos mancais aerostáticos são muito pequenas, uma vez que as forças de cisalhamento do meio gasoso são pequenas. Como consequência a quantidade de calor desenvolvida é pequena e facilmente transportada para fora da fenda pelo fluxo relativamente alto de ar.

As guias e mancais aerostáticos são utilizados principalmente em equipamentos de precisão e ultraprecisão, tais como tornos para ferramentas de diamante, fresadoras verticais com ferramenta monocortante ("flycutter"), retificadoras de ultraprecisão, em mesas rotativas de máquinas de medição de circularidade e máquinas de medir por coordenadas.

Os mancais aerostáticos funcionam muito suavemente, possuem alta repetibilidade de movimento e apresentam erros de concentricidade de rotação baixos. Os erros de concentricidade em relação ao eixo do mancal são determinados principalmente pela precisão geométrica das peças componentes do mancal.

Em mancais aerostáticos, o fluido, normalmente o ar, pressurizado externamente a uma pressão de 4 a 10 bar, é

alimentado para a fenda do mancal, que normalmente varia de 5 a 25 μm [7,9].

A capacidade de carga é resultante da distribuição de pressão efetiva na fenda do mancal, enquanto a rigidez é função da forma da fenda e do tipo de restritor que controla a taxa de fluxo no interior da fenda. Embora a sua capacidade de carga e rigidez sejam menores que a dos mancais hidrostáticos, como as forças aplicadas na usinagem de precisão e de ultraprecisão são pequenas, eles satisfazem estes requisitos, sendo os mais utilizados, principalmente nas guias e em árvores de máquinas-ferramentas de ultraprecisão.

Sendo os mancais e guias aerostáticos os que apresentam as características mais indicadas para a construção de máquinas de ultraprecisão, faz-se necessária uma revisão mais detalhada destes elementos, para que assim se possa avaliar melhor as aplicações pretendidas.

Apresenta-se a seguir uma revisão bibliográfica sobre mancais aerostáticos, onde serão apresentados o princípio de funcionamento, os diversos tipos e formas de mancais aerostáticos, tipos de restritores, suas aplicações, bem como as dificuldades de fabricação.

2.3 Revisão Bibliográfica - Mancais Aerostáticos

Na fabricação de precisão e ultraprecisão as tecnologias a elas relacionadas exigem, cada vez mais, requintes de desempenho como a suavidade de movimento, precisão de posicionamento e baixo atrito. Estes são perfeitamente atendidos por mancais com lubrificação a filme de fluido, sejam hidrostáticos ou aerostáticos.

Na seleção do mancal adequado, devem-se comparar as diversas características, nos diversos tipos de mancais, avaliando e comparando seus fatores operacionais, tendo em vista aqueles que sejam de maior interesse para a aplicação desejada.

Tem aumentado a demanda de mancais aerostáticos, principalmente em guias e árvores de máquinas-ferramentas de precisão e ultraprecisão e sistemas de medição, pois eles apresentam vantagens sobre os demais tipos de mancais, principalmente no que se refere à limpeza, não exigindo retorno do fluido, momento de partida e de parada suaves, baixo atrito em aplicações em baixa e alta velocidade relativa. Quando usados corretamente, mancais aerostáticos em árvores e guias de máquinas-ferramentas, requerem pouca manutenção.

Na utilização de um mancal aerostático, deve-se considerar os diversos tipos e combinações empregados em concepções de árvores de máquinas-ferramentas, analisando-se principalmente sua capacidade de carga e rigidez confrontados com a limitação de espaço disponível, as dificuldades e os custos de fabricação.

Nas publicações acerca de mancais aerostáticos

[7,9,10,11] os autores mencionam as dificuldades de fabricação como fatores limitantes do seu projeto, enfatizando, entre outros fatores, o alto grau de precisão dimensional, de forma e acabamento superficial requeridos para os seus componentes, mas dando escassas informações sobre a metodologia de fabricação dos mesmos. Acrescentam-se a isto as dificuldades no Brasil para importação ou construção de máquinas-ferramentas adequadas para fabricação de mancais aerostáticos, ficando evidente a necessidade de contribuições nesta área.

Como consequência das dificuldades técnicas de fabricação de mancais aerostáticos, foi desenvolvida uma técnica no Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina, na qual um dos componentes do mancal (rotor) é fabricado com alta precisão dimensional, de forma e baixa rugosidade, e o contrapar (estator) é obtido, a partir deste, por moldagem [12].

Neste trabalho esta técnica é estudada e ampliada para mancais rotativos e de deslocamento linear, analisando-se as dificuldades e soluções apresentadas para a fabricação dos componentes, permitindo o desenvolvimento de uma metodologia de fabricação que possa ser utilizada em máquinas-ferramentas convencionais, a baixo custo, e que possam ser utilizados industrialmente.

2.3.1- Histórico

Apresenta-se um levantamento histórico sobre mancais aerostáticos baseado nos trabalhos de Powell [9], Slocum [10] e

Purquério [11].

Os primeiros estudos sobre mancais pressurizados externamente foram realizados em 1828, por Willis [13], que identificou os efeitos da pressão produzida entre duas superfícies planas e opostas, tendo em uma delas um orifício alimentado com ar sob pressão.

A possibilidade de redução de atrito através do uso de mancais aerostáticos foi indicada por Hirn [14], em 1854.

Nova contribuição ao estudo dos mancais aerostáticos foi proporcionada em 1897, por Kingsbury [15], que construiu um mancal radial lubrificado com ar e/ou com nitrogênio. A partir desta data, ficou demonstrada a viabilidade dos mancais a gás, principalmente na redução do atrito, uma vez que até aquela época, os lubrificantes usuais eram a água ou o óleo.

As primeiras patentes surgiram no início do século vinte, quando a Westinghouse [16], em 1904, desenvolveu um mancal aerostático axial, para suportar o eixo vertical de uma turbina. Abbott [17], em 1920, patenteou um projeto para um mancal aerostático radial.

Naquela época não foi conseguido grande progresso em relação às aplicações, uma vez que havia dificuldades em se obter as tolerâncias de fabricação necessárias. Por outro lado, os métodos teóricos disponíveis eram limitados às soluções aproximadas da equação de Reynolds, 1886, [18], para fluidos incompressíveis, complementadas pelos métodos analíticos de Somerfeld (1904) e Michel (1905).

Valiosa contribuição para o estudo da lubrificação a ar foi dada por Harrison [19], em 1913, que desenvolveu uma forma

apropriada para a equação de Reynolds, para fluidos compressíveis.

A não linearidade das equações envolvidas e a falta de meios para resolvê-las, resultaram em um lento progresso para previsões teóricas que sustentassem as investigações experimentais.

Há 30 anos, era praticamente inexistente a utilização de mancais aerostáticos pelas indústrias. Na década de 60 foram iniciados os primeiros programas de pesquisas visando à aplicação de mancais aerostáticos em produtos manufaturados, no National Engineering Laboratory, sob a liderança de H.L. Wunsch, quando foram feitas as primeiras aplicações de mancais a ar em árvores de retificadoras, guias de máquinas e instrumentos para medição de forma, que posteriormente foram comercializados por Churchill Machine Tool Co. Ltd.. Na University of Southampton, sob a direção de N.S. Grassam, foi realizado um trabalho que se preocupou principalmente com os problemas de operação dos mancais em altas velocidades, sendo em 1962 desenvolvido, provavelmente, o primeiro produto com mancal a ar, em escala industrial, que foi uma furadeira de dentista com turbina a ar, operando a 500.000 min^{-1} . Posteriormente, este produto foi industrializado por Dental Manufacturing Co. Ltd.. Em 1963, surgiu o Westwind Turbines Ltd, como sub-produto do programa da Southampton, que se direcionou para a aplicação de mancais aerostáticos em máquinas-ferramentas e instrumentos científicos. Milhares de furadeiras da Westwind, com árvores de 100.000 min^{-1} foram empregadas na furação de precisão de circuitos eletrônicos impressos, utilizados em computadores industriais.

Na década de 60, foram efetuados inúmeros avanços na tecnologia da lubrificação a ar, tanto no campo teórico da lubrificação com ar, com Gross [20], em 1962, e Constantinescu [21], em 1969, como na prática do projeto com Grassan [22], em 1964 e Powell [9], em 1970.

Um grande impulso ao estudo dos mancais aerostáticos foi dado em 1966, quando foi publicado na Inglaterra o relatório Jost [23], sobre a posição e as necessidades da indústria no campo da lubrificação.

Na década de 70, os mancais aerostáticos se firmaram nas aplicações de retificação de precisão, microfuração e numa variedade de instrumentos, tais como: máquinas de medir circularidade e medidores de vazão em turbinas.

Recentemente, vários trabalhos têm dado ênfase aos procedimentos de projeto, principalmente para os mancais axiais e radiais. Assim, Satomi [24] apresenta a teoria para a rigidez e estabilidade estática no projeto de sistemas de guias aerostáticas, aplicando a teoria de restrição por orifício nas regiões de maiores folgas e a teoria de restrição inerente, nas regiões de menores folgas, para os casos com e sem rebaixo. Roblee [25] apresenta um método de projeto para mancais axiais, baseado em um modelo dinâmico para o mancal aerostático, permitindo selecionar a rigidez e o amortecimento de mancais sujeitos a vibrações. Discute ainda as restrições de projeto a serem consideradas no procedimento de projeto iterativo. Purquério [26] descreve o projeto e construção de um banco de ensaios para experimentos com mancais axiais; após vários ensaios, foram obtidas as características de capacidade de carga

e rigidez em função da folga. Os resultados obtidos são comparados com os valores teóricos, calculados pela metodologia de Powell [9].

2.3.2 Princípio de operação do mancal aerostático [8,9].

O mancal aerostático consiste, basicamente, de duas superfícies, separadas por um filme de ar, suprido por uma fonte externa.

Na Figura 7 ilustra-se o princípio de operação de mancais aerostáticos radial e axial, típicos [8].

O ar, suprido por uma fonte externa, a uma pressão P_o , passa pelos orifícios de alimentação do mancal e chega até a fenda existente entre as duas superfícies, a uma pressão menor que P_o , escoando até as extremidades do mancal para a atmosfera, a uma pressão P_a .

Quando o eixo não está carregado, e desprezando-se o peso próprio do eixo, este está centrado em relação à luva do mancal. As forças de pressão no eixo estão em equilíbrio, e $Pd1 = Pd2$.

Quando se carrega o eixo verticalmente, este deflete na direção da carga, de modo que, na figura 7, a folga aumenta na parte superior e diminui na inferior. A resistência à vazão de ar diminui na parte superior do mancal, fazendo com que mais ar escape para a atmosfera, provocando maior queda de pressão através dos orifícios de alimentação, fazendo com que a pressão $Pd1$ diminua.

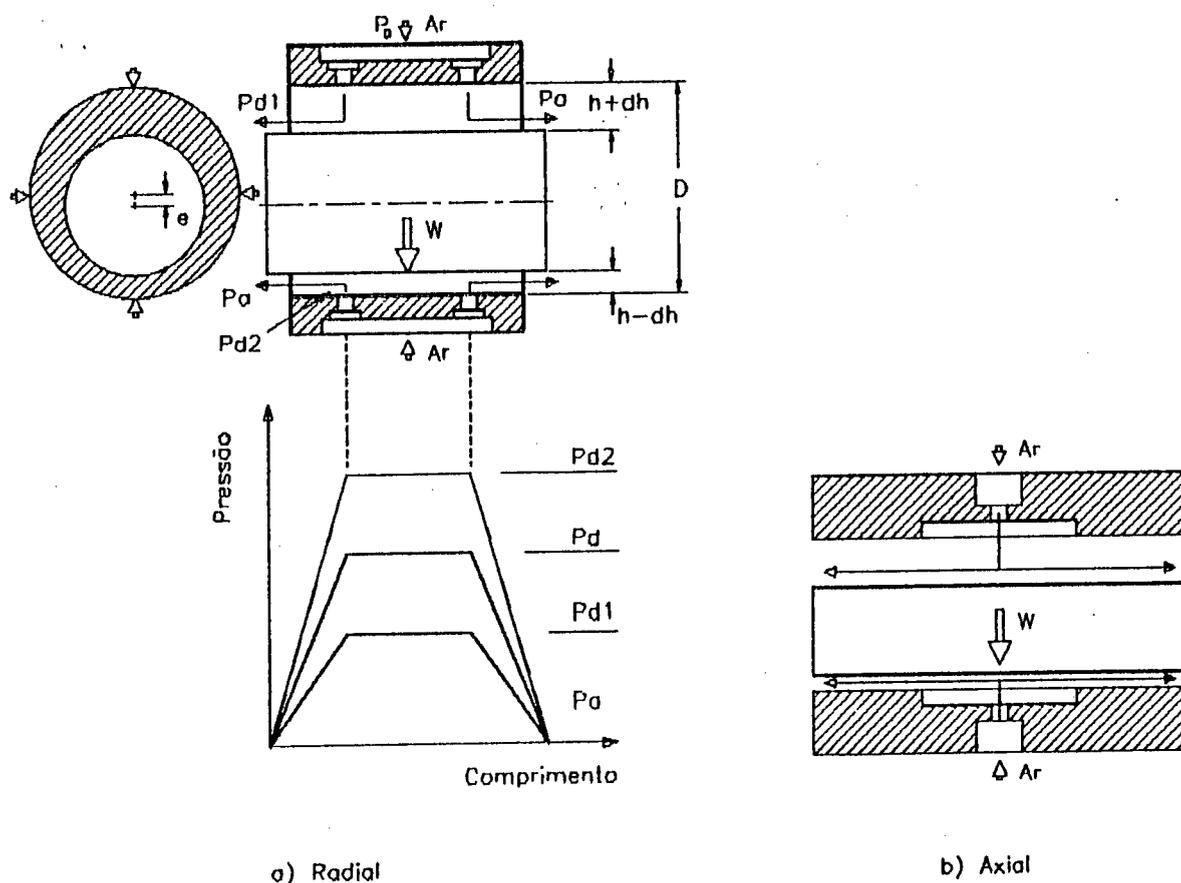


FIGURA 7 - Mecanismo de operação dos mancais aerostáticos radiais e axiais [8].

Na parte inferior ocorre o contrário, aumentando a resistência à vazão do ar, de modo que menor quantidade de ar flui através dos orifícios e da folga do mancal. Assim, há uma redução na queda de pressão através dos orifícios e a pressão P_{d2} aumenta. A diferença de pressão ($P_{d2} - P_{d1}$) se equilibra com a carga aplicada.

Havendo variação na carga aplicada, haverá variação na folga do mancal. A taxa de variação da carga aplicada com relação a variação da folga do mancal é definida como sendo a rigidez do mancal. O mancal deve ser projetado para o ponto de máxima rigidez.

2.3.3 Tipos e formas de mancais aerostáticos

Os mancais aerostáticos podem ser classificados de diversas formas:

a) Quanto à direção da carga:

Os mancais permitem o movimento relativo entre os componentes de máquinas. A forma do mancal é determinada pela natureza do movimento relativo exigido, bem como pelos tipos de vínculos a ele aplicados. Podemos, então, classificar os mancais aerostáticos quanto à direção da carga em: radiais, axiais e combinação radial/axial.

Os mancais para máquinas-ferramentas normalmente recebem carregamento radial e axial, isto é solucionado através da combinação de um mancal radial/axial. Várias concepções de projeto permitem atender esta exigência de carregamento, como por exemplo, um par de mancais radial e axial, mancais cônicos ou esféricos.

b) Quanto à forma geométrica:

Dentro das três categorias citadas anteriormente, radial, axial e combinados, podemos destacar outras formas ou tipos de mancais que, quanto à forma geométrica, podem ser:

- cilíndricos

- circulares
- cônicos
- esféricos.

A Figura 8 mostra as formas típicas de mancais aerostáticos, pressurizados externamente [8].

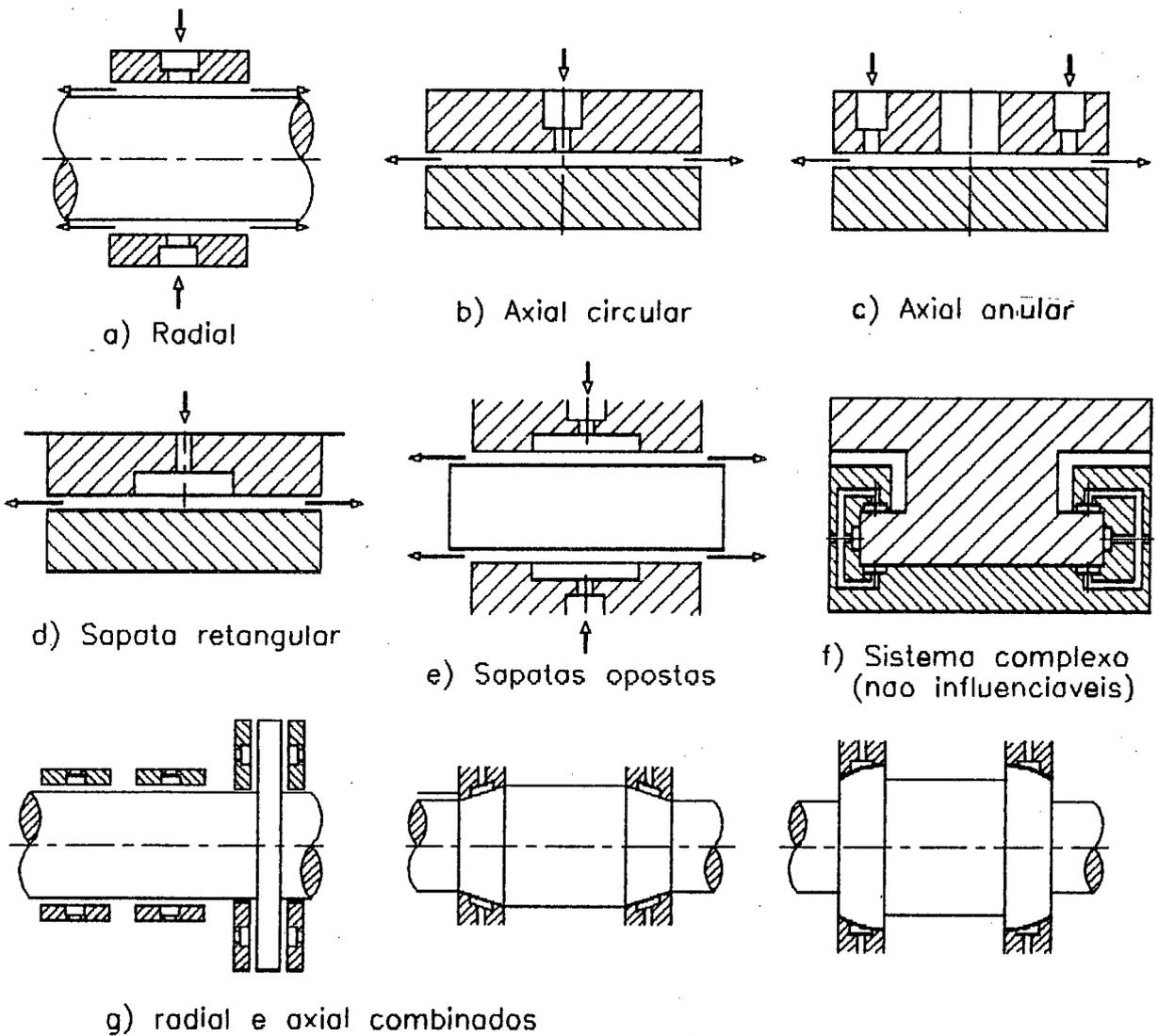


FIGURA 8 - Geometria dos mancais aerostáticos [8].

As sapatas retangulares são adequadas para guias lineares e podem ter uma fileira de restritores, como mostrado na figura 8-d, ou duas fileiras de restritores, para aumentar a rigidez de inclinação. Quando o carregamento pode ser feito em dois sentidos opostos, utilizam-se sapatas opostas, como mostrado na figura 8-e, tendo-se um aumento de 50% na rigidez do mancal [8].

Os mancais podem também ser dispostos adequadamente, conforme as necessidades, formando sistemas complexos, como o mostrado na figura 8-f.

Quando há necessidade de suportar cargas axiais e radiais, os mancais radiais são utilizados em combinação com um mancal axial, conforme ilustrado na figura 8-g. Este arranjo pode resultar da junção de dois pares de mancais radiais e axiais, mancal cônico, dois mancais semi-esféricos ou esférico.

Embora estas configurações tenham basicamente a mesma função, é importante analisá-las do ponto de vista da vazão, rigidez e, principalmente, dificuldade de fabricação. É importante ainda observar que, em geral, os mancais aerostáticos podem ser alimentados por uma ou duas fileiras de orifícios.

A alimentação por fileiras duplas proporciona maior rigidez de inclinação, maior capacidade de carga (33%) e maior rigidez (33%), mas, por outro lado, a vazão é duplicada [8,9].

A seguir, faz-se uma análise das principais dificuldades de fabricação para estes mancais.

Para o mancal radial da figura 8-a, o principal problema é obter a precisão dimensional e de forma, com baixa rugosidade, tanto para o eixo quanto para a luva (estator).

Valores característicos da folga se situam em torno de $25 \mu\text{m}$.

Para os mancais axiais da figura 8-b e 8-c e para a sapata retangular da figura 8-d, a principal dificuldade é usinar as superfícies com planicidade elevada e bom acabamento superficial.

Para as configurações das figuras 8-e e 8-f, as dificuldades de fabricação estão relacionadas à obtenção de superfícies planas e paralelas, dentro das tolerâncias dimensionais e de rugosidade projetadas.

Na combinação de mancal radial e axial da figura 8-g, além da dificuldade de obtenção das precisões dimensionais, de forma e de rugosidade, acrescenta-se a dificuldade de montagem do disco (mancal axial) sobre o eixo de forma perpendicular, visto que um erro de perpendicularismo entre os mancais axial e radial provoca o contato entre as superfícies do mancal.

Dificuldades semelhantes são encontradas na fabricação dos mancais cônicos da figura 8-g, agravadas pela dificuldade de obtenção das peças com a mesma conicidade.

O mancal semi-esférico apresenta como principal obstáculo a fabricação dos componentes esféricos com a precisão dimensional, de forma e baixa rugosidade com que são projetados. Valores típicos de projeto situam-se em torno de $10 \mu\text{m}$ para a fenda do mancal, exigindo erros de esfericidade inferiores a $1 \mu\text{m}$ e rugosidade $R_a < 0,1 \mu\text{m}$. Por outro lado, apresentam a vantagem de tolerar pequenos erros de alinhamento na montagem.

2.3.4 Tipos de restritores (método de compensação)

Nos mancais aerostáticos, a relação entre a carga e a espessura do filme lubrificante não é linear, conforme mostra a figura 9, para um mancal aerostático axial [8].

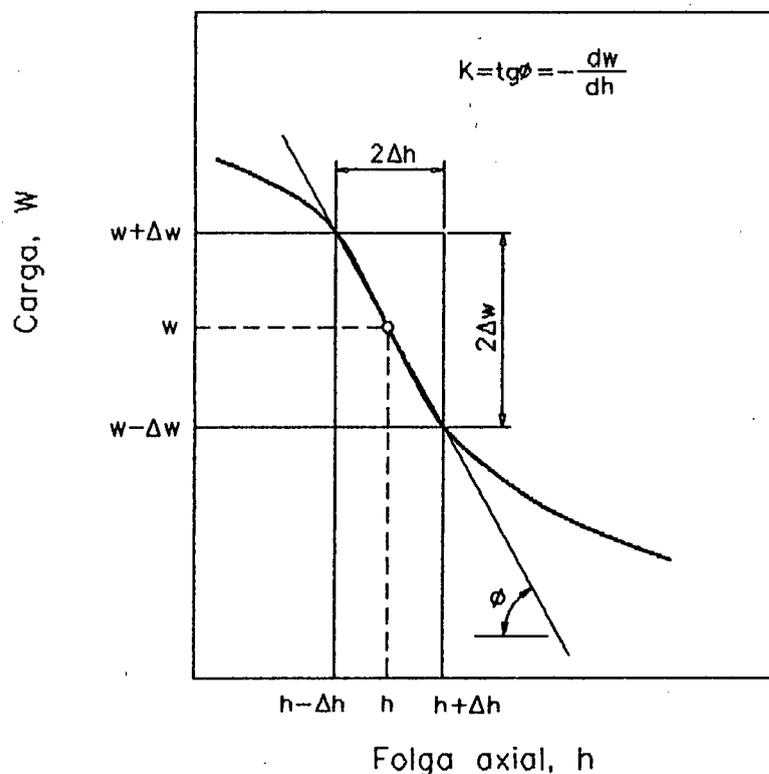


FIGURA 9 - Carga em função da espessura do filme para um mancal aerostático axial [8].

A rigidez do mancal é então definida como sendo a taxa de variação da carga em relação à variação da folga do mancal, ou seja,

$$K = \operatorname{tg} \phi = - d W / d h \quad (1)$$

O sinal negativo significa que para um aumento de carga no mancal haverá uma redução na folga.

O ponto da curva com a maior inclinação é o ponto de máxima rigidez, sendo este o ponto de operação ótima do mancal.

A rigidez do mancal depende, essencialmente, do método de controle do escoamento do fluido no mancal, ou seja, do método de restrição (ou compensação).

Conforme se mostra na figura 10, existem para os mancais aerostáticos, vários tipos de restritores de vazão, os quais, quanto ao método de compensação, podem ser assim classificados: de orifício (com ou sem rebaixo), de ranhura, capilar, poroso e flexível [27].

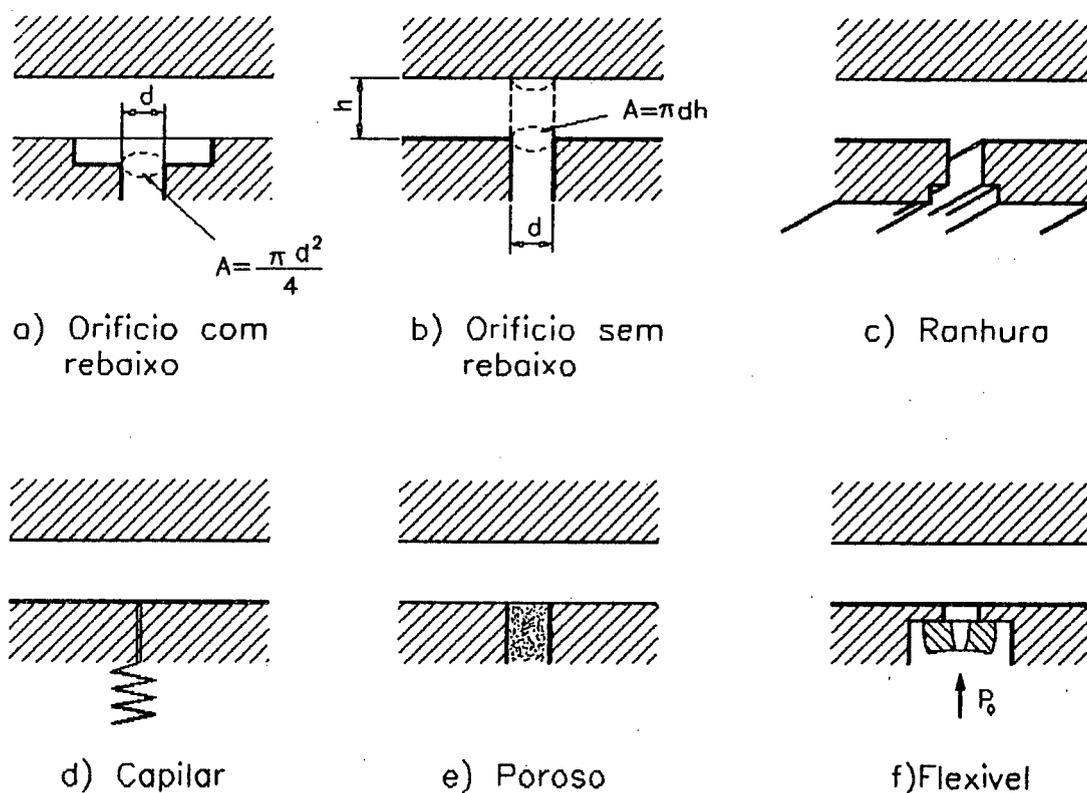


FIGURA 10 - Tipos de restritores de vazão para mancais aerostáticos [27].

Os restritores de orifício são os mais utilizados, normalmente construídos em bujões (plugues) roscados ou colados na luva do mancal. O restritor de orifício sem rebaixo, mostrado na figura 10-b, proporciona menor capacidade de carga para o mancal (aproximadamente 30% menos), comparado ao restritor de orifício com rebaixo, mostrado na figura 10-a. Em compensação é de mais fácil fabricação, além de estar menos sujeito a problemas de instabilidade pneumática.

Os restritores de ranhuras, mostrados na figura 10-c, podem ser usinados nas superfícies adjacentes do mancal, ou produzidos através de calços. Este tipo de restrição proporciona uma rigidez e uma capacidade de carga maiores que os restritores de orifício com rebaixo, mas a um custo de fabricação bem maior [8,27].

O restritor de capilar, mostrado na figura 10-d, é composto de um tubo de diâmetro capilar e de comprimento longo. Tem limitações na aplicação de mancais aerostáticos, por apresentar instabilidade pneumática e dificuldade de fabricação. São largamente utilizados em mancais hidrostáticos, construídos a partir de tubos de agulha hipodérmica [8].

O restritor poroso, figura 10-e, consiste de um inserto de material poroso alojado em furos feitos no mancal, ou na fabricação do estator de um material poroso. A capacidade de carga e rigidez de um mancal com restritor poroso é função de sua permeabilidade, sendo que os poros podem ser considerados como um grande número de restritores em paralelo, possibilitando melhor distribuição de pressão no mancal, aumentando sua estabilidade. A limitação na fabricação deste tipo de restritor está relacionada

à obtenção de uma distribuição homogênea dos poros.

O restritor flexível usualmente é confeccionado em borracha ou outros materiais flexíveis, alojados em furos ou estojos apropriados. Embora sejam projetados para operarem com grandes folgas, que facilitam a fabricação de seus componentes, apresenta dificuldades para a fabricação do restritor com as dimensões e flexibilidade requeridas.

2.3.5 Aplicações de mancais aerostáticos

A utilização industrial de mancais aerostáticos tem aumentado muito nos últimos anos, principalmente na indústria eletrônica, de automação, aeronáutica, nuclear, de medição e de máquinas-ferramentas [7,8,9,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38].

a) Aplicações de mancais aerostáticos em máquinas-ferramentas

Os mancais aerostáticos são largamente utilizados em cabeçotes de máquinas-ferramentas de elevada precisão que operam a média e alta velocidades. Uma das principais aplicações tem sido em cabeçotes de retificadoras, como os mostrados na Figura 12 [35].

Outra aplicação, tem sido em cabeçotes de alta velocidade acionados por turbina e utilizados para furação de circuitos impressos, retificação interna e retificação planetária.

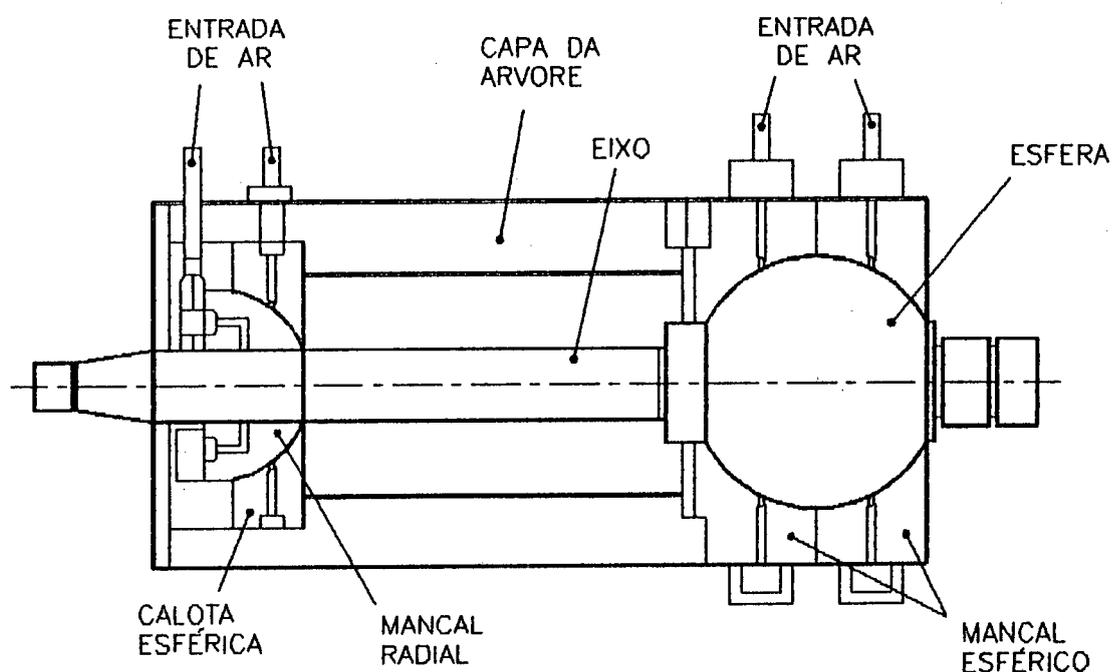


FIGURA 11 - Cabeçote de retificação com mancal aerostático [35].

Os mancais aerostáticos são utilizados em máquinas-ferramentas que empregam ferramentas de corte de diamante e em máquinas-ferramentas geradoras de superfícies ópticas. Nestas máquinas, tanto as guias lineares das mesas como os árvores rotativas dos cabeçotes e mesas rotativas são construídas com mancais aerostáticos. Uma aplicação típica destas máquinas é a fabricação de partes ópticas de telescópios de raios-X, atingindo rugosidade Ra de até 1 nm [7].

b) Aplicação de mancais aerostáticos em sistemas de medição

Os mancais aerostáticos também são bastante utilizados em sistemas de medição, tais como: máquinas de medir circularidade e máquinas de medir por coordenadas. Atualmente, as máquinas de medir circularidade, dotadas de mancais radiais e axiais combinados, atingem precisão rotacional da ordem de 0,05 μm . Nas máquinas de medir por coordenadas, a ausência de atrito possibilita um deslocamento e posicionamento com grande precisão, proporcionando medições mais rápidas e eficientes.

c) Outras aplicações para os mancais aerostáticos.

A baixa viscosidade do ar resulta em baixo atrito, nos mancais aerostáticos, permitindo sua aplicação em dinamômetros para motores, guias de instrumentos de medição, giroscópios ou em aplicações que requerem velocidades extremamente elevadas, tais como brocas dentárias e centrifugadoras.

Nestes mancais, como não há contato entre as superfícies espera-se um desgaste zero, permitindo aplicações com elevada repetibilidade funcional em medidores de vazão, periféricos de computadores e máquinas têxteis.

Os mancais aerostáticos podem ainda ser utilizados em sistemas onde se exige alta precisão de movimento, baixa vibração ou que exijam a não contaminação do ambiente, tais como: sistemas de medição, máquinas para fabricação de espelhos de precisão com substrato metálicos e equipamentos de submarinos.

2.3.6 Instabilidade pneumática e escoamento supersônico

A compressibilidade dos gases pode causar um fenômeno de instabilidade nos mancais aerostáticos com rebaixo. Esta ocorre em consequência do atraso existente entre as variações da folga do mancal e a resposta a essa variação, através das variações de pressão no rebaixo do orifício [10].

Se o tempo de resposta for longo e o volume do rebaixo for elevado, o aumento da pressão resultante pode ser excessivo, proporcionando um aumento na folga do mancal. Esse aumento na folga do mancal vai reduzir a pressão no rebaixo do orifício e reduz a pressão na folga do mancal, fazendo com que haja redução na folga do mancal.

A redução na folga do mancal (entre as superfícies) gera o aumento da resistência ao escoamento, fazendo com que a pressão aumente. Como consequência do aumento da pressão, a folga entre as superfícies aumenta e o ciclo se repete.

Esta instabilidade é devida ao amortecimento ineficiente do ar e é conhecido por martelo pneumático. Ela é acentuada nos mancais axiais, devido ao fato de ser muito maior o volume de ar nos rebaiços dos orifícios do que na fenda do mancal. Um recurso para evitar este problema está na redução da profundidade (na prática, a profundidade do rebaixo mínimo de $\delta = d/4$) [9] e do diâmetro do rebaixo, o que torna a fabricação mais difícil ou utilizar orifício sem rebaixo e aceitar a redução da capacidade de carga e rigidez, proporcionada por este tipo de restritor.

Outra preocupação que devemos ter no projeto de mancais

aerostáticos é a ocorrência de escoamento supersônico na saída do orifício de alimentação. Quando o mancal opera em uma pressão de alimentação elevada com relação à pressão ambiente, o escoamento do fluido pode se tornar supersônico, na vizinhança do furo de alimentação. Então, ocorrem ondas de choque no filme de ar do mancal, resultando em uma grande queda de pressão no escoamento.

Para evitar o fenômeno do escoamento supersônico pode-se, por exemplo, fazer furos de alimentação suficientemente grandes, de tal modo que a velocidade do escoamento na entrada do filme do mancal seja subsônico.

No entanto, o aumento do volume do furo de alimentação pode também provocar o fenômeno do martelo pneumático, descrito anteriormente, bem como, aumenta a vazão do ar.

2.3.7 Parâmetros básicos de projeto

Para se projetar um mancal aerostático, é necessário avaliar as características individuais de cada tipo de mancal, considerando aquelas de maior interesse para o projetista. Normalmente, estamos interessados em obter uma determinada capacidade de carga e rigidez. Estas dependem de uma série de variáveis:

- pressão de alimentação;
- vazão do ar;
- folga do mancal;
- tipo, dimensões, quantidade e posição dos restritores;
- relação entre o comprimento e o diâmetro do mancal;

- relação pressão de alimentação/pressão na folga;
- rugosidade das superfícies;

A correlação entre as diversas variáveis é feita através das equações da mecânica dos fluidos, resultando em equações diferenciais relativamente complexas (não lineares).

As equações que regem o escoamento de um fluido em mancais são apresentadas no anexo 1.

O campo de pressão para fluidos é fornecido pela equação de Reynolds para mancais,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\mu \frac{\partial}{\partial x} (\rho U h) \quad (2)$$

Para fluidos compressíveis a equação se modifica para,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \rho \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \rho \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\mu \frac{\partial}{\partial x} (\rho U h) \quad (3)$$

Esta equação possibilita o cálculo da carga que o mancal pode suportar e o fluxo de massa no mancal.

Powell [9], Slocum [10], Grassam [22] e Gross [20] desenvolvem estas equações, transformando-as em gráficos e tabelas, que facilitam bastante a tarefa do projetista.

Bispink [7] desenvolveu um programa para o cálculo computacional de mancais aerostáticos (aerosta). Uma ferramenta destas facilita o projeto e permite comparar e otimizar as várias opções de projeto. Prata [39] está desenvolvendo um programa com uma concepção ainda mais moderna, integrando tanto os conhecimentos mais atualizados da mecânica dos fluidos e teoria de escoamento e lubrificação como também as mais modernas

técnicas computacionais.

Outro aspecto a ser observado é quanto aos processos de fabricação necessários para a execução dos mancais, uma vez que, na maioria dos casos, envolvem faixas de tolerâncias bastante estreitas, exigindo processos de usinagem como a retificação, a lapidação e o polimento. Para exemplificar, as folgas de trabalho em mancais aerostáticos típicos situam-se em torno de 5 a 50 μm , podendo os mancais ter diferentes formas [7,8,9,10,20,22,25,26].

Além das estreitas tolerâncias de forma que devem ser mantidas nos elementos constituintes dos mancais aerostáticos, os elementos auxiliares, como tubeiras ou restritores e os rebaixos devem ser fabricados com rigorosa constância de fabricação, isentos de rebarbas ou erros de posição. Pequenas rebarbas nas bordas vivas dos restritores mudam sensivelmente o escoamento dos gases que fluem no mancal, mudando com isto a característica de funcionamento do mesmo. Deve-se considerar ainda que os melhores resultados são obtidos para diâmetros de restritores situados na faixa de 0,1 a 0,5 mm e a profundidade dos rebaixos situada na faixa de 0,05 a 0,3 mm. Isto exige equipamentos adequados que permitem garantir os resultados com boa repetibilidade.

Devido à compressibilidade do ar, a folga nos mancais aerostáticos deve ser pequena, exigindo boas características de fabricação das superfícies, quanto à tolerância de forma e acabamento, aumentando o seu custo de fabricação.

Uma das limitações na utilização de mancais aerostáticos em relação a mancais que operam com lubrificantes incompressíveis é o fato de eles sofrerem maior deflexão sob carga, ou seja, são menos rígidos que os mancais hidrostáticos.

Uma forma de se conseguir rigidez alta está na diminuição da folga, o que implica a necessidade de melhor qualidade geométrica dos componentes, aumentando ainda mais o custo de fabricação.

Dependendo da configuração adotada, são empregadas máquinas de alta precisão, que possibilitam fabricar os componentes com faixa de tolerâncias estreitas, abaixo de IT 5, exigindo que os mesmos sejam manuseados e montados utilizando as técnicas da fabricação de ultraprecisão.

Neste trabalho, optou-se pela fabricação de um mancal semi-esférico/plano, pelas razões discutidas no Capítulo 3, e pela fabricação de um mancal radial, aplicando em ambos a técnica de moldagem com resina.

Para o dimensionamento do mancal foram fixados as dimensões (diâmetro e comprimento), a folga do mancal, o número e diâmetro dos restritores e a pressão de suprimento, sendo necessário calcular a capacidade de carga, rigidez e vazão do ar.

Neste processo foi utilizada a metodologia de projeto proposta por Powell [9], complementada pelo procedimento de Cardieri [41], que consiste num método de equivalência entre mancais aerostáticos axiais e esféricos. Um resumo dos mesmos é apresentado nos anexos 2, 3 e 4.

A figura 12 mostra o mancal aerostático semi-esférico/plano projetado e construído no desenvolvimento deste trabalho, sendo diretamente acionado por um motor elétrico.

Dimensionando-se o mancal semi-esférico/plano de acordo com as considerações acima e a metodologia de projeto proposta por Powell [9] e Cardieri [41], chega-se aos valores de projeto

abaixo relacionados, válidos para uma pressão de alimentação de 4 bar, razão de pressão $K_{go} = 0,4$ e coeficiente de excentricidade $\epsilon = 0,5$.



FIGURA 12 - Mancal aerostático semi-esférico/plano, com acionamento por motor elétrico.

DADOS TEÓRICOS PARA O MANCAL SEMI-ESFÉRICO/PLANO:

a) Lado esférico:

diâmetro externo do rotor	100 mm
espessura do rotor	42 mm
número de restritores	24
diâmetro do restritor	0,18 mm
folga do mancal	10 μm
carga axial , lado esférico	774 N
rigidez axial, lado esférico	124 N/ μm
vazão	$0,27 \times 10^{-4}$ l/s

b) Lado plano

diâmetro externo do disco	120 mm
diâmetro interno do disco	50 mm
número de restritores	24
diâmetro do restritor	0,18 mm
folga do mancal	25 μm
carga axial, lado plano	1160 N
rigidez axial, lado plano	182 N/ μm
vazão	$1,9 \times 10^{-4}$ l/s

O mancal aerostático radial é constituído de três fileiras de oito restritores, furos sem rebaixo, posicionados no centro e a 1/4 das extremidades do mancal, alimentados de forma independentes, podendo ser ensaiado com apenas uma fileira central ou com duas fileiras.

A alimentação dos mancais é feita através de um compressor com pressão nominal de 8 bar. Entretanto, a válvula

reguladora de pressão disponível possibilita uma regulagem máxima de 5,5 bar. Os ensaios são realizados para as pressões de 2, 3, 4 e 5 bar. A seguir apresenta-se os valores teóricos obtidos para o mancal alimentado com duas fileiras de restritores posicionados a 1/4 das extremidades do mancal, para uma pressão de 4 bar.

DADOS TEÓRICOS PARA O MANCAL RADIAL MOLDADO

diâmetro do eixo	85 mm
número de restritores	8 mm
comprimento do mancal	127.5 mm
diâmetro dos restritores	0.18 mm
carga radial	687 N
rigidez estática	108 N/ μ m
vazão	$0,5 \times 10^{-4}$ l/s

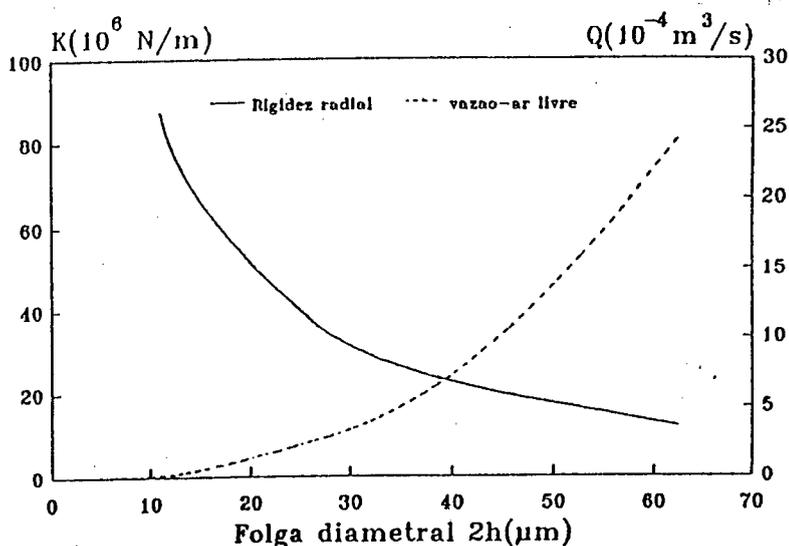
CAPÍTULO 3

FABRICAÇÃO DE MANCAIS
AEROSTÁTICOS SEMI-ESFÉRICOS

3.1 Fabricação de Mancais Aerostáticos Semi-Esféricos

Os mancais aerostáticos utilizados em árvores de máquinas-ferramentas de precisão e de ultraprecisão são projetados de modo a operarem com a máxima rigidez possível, exigindo que os mesmos sejam fabricados com uma pequena folga entre o rotor e o estator, uma vez que, quanto menor a folga, maior será a rigidez do mancal e menor será o consumo de gás.

A variação da rigidez e da vazão volumétrica do gás com a variação da folga, para mancais aerostáticos radiais, podem ser vistas nos gráficos da figura 13 [9].



Diametro mancal: 50 mm
comprimento mancal: 50 mm
pressão suprimento: $6,9 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

FIGURA 13 - Variação da rigidez e da vazão com a folga para mancais radiais [9].

Para os mancais aerostáticos esféricos os problemas de dimensionamento são agravados pela falta de informações na literatura técnica [41] e as dificuldades de fabricação para se obter a folga de trabalho, que tipicamente se situa em torno de $10 \mu\text{m}$, e o erro de esfericidade na ordem de $0,1 \mu\text{m}$, exigindo-se acabamento superficial $Ra < 0,1 \mu\text{m}$ [42,43,44]. Deseja-se projetar e construir um mancal aerostático semi-esférico/plano que possa ser utilizado em árvores de máquinas-ferramentas de ultraprecisão.

A fabricação do mancal com folga mínima exige alta precisão de fabricação para os elementos do mancal, implicando no aumento dos custos, sendo ainda limitada pela capacidade de fabricação disponível.

Tendo em vista as dificuldades de fabricação para folgas menores, tem-se buscado o aumento da rigidez e da capacidade de carga dos mancais através de novos métodos de restrição, como controles externos ou restrições flexíveis que proporcionem boa rigidez para o mancal, mesmo trabalhando com folgas maiores [11,45,46]. Por outro lado, a redução de custos proveniente de uma fabricação mais fácil, com folga maior, normalmente é superada pelos custos extras das soluções adotadas.

Embora os pesquisadores ponham as dificuldades de fabricação entre os fatores limitantes do projeto de mancais aerostáticos e enfatizem que sua construção é dificultada pela exigência do alto grau de precisão dimensional, de forma e rugosidade requeridos, poucas informações sobre a metodologia de fabricação são disponíveis nos trabalhos [7,9,11,20,22,41,47]. Mesmo porque, naturalmente os fabricantes de mancais resguardam

as informações importantes sobre as operações e procedimento de fabricação dos mesmos, que são tratadas como segredo industrial.

Efetivamente, embora existam estudos teóricos bastante profundos sobre a metodologia de projeto para mancais aerostáticos [9,10,20,22,25], é muito difícil o acesso à bibliografia específica sobre a sua metodologia de fabricação.

Com o objetivo de elaborar uma metodologia para a fabricação de mancais semi-esféricos que possam ser utilizados em árvores de máquinas-ferramentas de precisão e de ultraprecisão, a seguir serão analisadas as dificuldades de fabricação dos mesmos.

O mancal a ser desenvolvido deve ter apenas um grau de liberdade que lhe permita girar em torno do seu eixo, tendo restrição de movimento na direção axial e radial.

Esta exigência é atendida pelas diversas concepções de mancais mostrados na figura 14, podendo ser compostos de um eixo e duas placas planas, figura 14-a, um eixo e uma esfera, figura 14-b, uma semi-esfera e uma placa plana, figura 14-c, bem como por um mancal composto de duas semi-esferas, figuras 14-d e 14-e, por um cone e uma placa plana, 14-f, ou ainda por dois cones, 14-g.

A concepção eixo e duas placas planas representa a geometria mais simples, no entanto exige uma elevada precisão na confecção e montagem dos componentes. Um erro de ortogonalidade entre o furo e as faces do estator ou entre o eixo e as faces internas do rotor leva a uma variação das folgas do mancal e com isto à falha no funcionamento.

A concepção formada por um eixo e uma esfera apresenta um grau de dificuldade grande na fabricação dos componentes,

exigindo um perfeito alinhamento entre o eixo de rotação do cilindro e o centro da esfera, tanto no estator como no rotor. Além disto, o estator tem que ser fabricado de forma bi-partida.

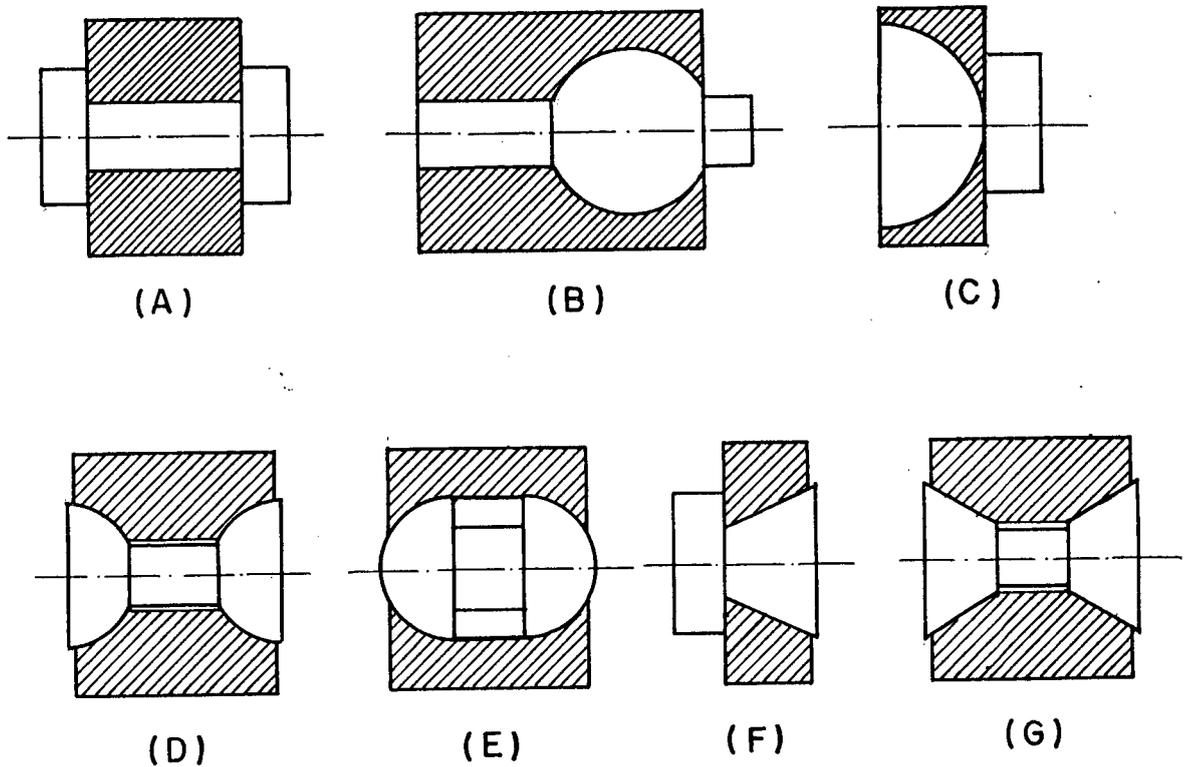


FIGURA 14 - Representação esquemática de mancais rotativos (1 grau de liberdade).

As concepções "f" e "g" da figura 14 apresentam dificuldades de fabricação semelhantes às obtidas na concepção "a", acrescidas da dificuldade em realizar ângulos externos idênticos, sendo pouco usuais.

As dificuldades técnicas na fabricação destes mancais aumentam quando se trabalha com mancais com restrição na saída.

Isto significa que a folga do mancal é menor na saída que na entrada de ar. Essa diferença da folga está situada na faixa de 6 a 10 μm e deve obedecer uma simetria rigorosa nos componentes adjacentes. Apesar de aumentar a capacidade de carga do mancal, a restrição na saída é pouco usada.

Nas concepções "c", "d" e "e" da figura 14, onde os mancais são formados por uma semi-esfera e uma placa plana ou por duas semi-esferas, procura-se contornar as dificuldades anteriormente descritas. Os elementos fabricados podem ser montados sem haver uma preocupação extrema com a concentricidade entre o eixo de simetria e o posterior eixo de rotação do mancal, uma vez que pequenos erros de alinhamento são tolerados, permitindo o giro do mancal. Entretanto, deve-se ressaltar que erros de fabricação e de montagem levam a um desbalanceamento do mancal e a um erro de batimento das faces do mesmo. Estes defeitos podem ser corrigidos posteriormente.

O mancal de duas calotas semi-esféricas tem apenas um grau de liberdade que lhe permite girar em torno de seu eixo, tendo restrições de movimento na direção radial e axial.

Na fabricação de mancais com componentes esféricos ou semi-esféricos deve-se citar a dificuldade de fabricação destes componentes em materiais metálicos, que devem apresentar dimensões finais com qualidade superficial adequada para a folga pré-estabelecida. Os erros admitidos estão situados na ordem de alguns milésimos de milímetro. Geralmente a fabricação exige um acabamento por lapidação de par-contra-par, a um custo muito elevado.

Em consequência das dificuldades técnicas na fabricação

dos mancais aerostáticos esféricos ou semi-esféricos, procurou-se aprimorar a técnica de fabricação de mancais numa tecnologia híbrida, empregando-se metal (aço inoxidável ou bronze) como material básico e um revestimento em resina nos componentes do estator.

Neste processo de fabricação alternativo, será estudada a possibilidade de se fabricar um mancal aerostático rotativo (semi-esférico/plano) com a utilização de resinas com cura a frio como revestimento para a calota semi-esférica que será obtida a partir do rotor semi-esférico, pelo processo de moldagem.

Para a fabricação do protótipo optou-se pela concepção mancal semi-esférico/plano uma vez que o processo de fabricação por moldagem pode ser aplicado sem restrições para os outros tipos de mancais.

Mesmo empregando-se a técnica de moldagem em resina, a fabricação dos componentes do rotor continuam sendo componentes de elevada precisão dimensional. Para conhecer as influências que os erros de posição, erros geométricos da ferramenta e do processo de fresamento e de torneamento têm sobre a fabricação de calotas esféricas, foi efetuado um estudo abrangente destas influências por Vallejos [48].

A partir dos resultados obtidos por Vallejos no torneamento e no fresamento de semi-esferas aprimora-se a qualidade das mesmas por lapidação de forma. Aqui, apesar de terem sido obtidos resultados satisfatórios, a técnica de lapidação ainda não está totalmente dominada, sendo ainda estudada no Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina.

Serão necessários a aplicação de técnicas e procedimentos de manuseio e de montagem durante a fabricação dos componentes, que garantam as tolerâncias desejadas, devendo-se considerar todos os fatores que influem no processo de fabricação, tais como constância da temperatura, características da matéria-prima, características das ferramentas, bem como o trabalho em condições de usinagem otimizadas.

No revestimento do estator são empregadas resinas comerciais, empregadas na fabricação das guias de máquinas-ferramenta (Diamant Moglice [49], da Diamant Plasticmetal). Estas resinas apresentam um pequeno índice de contração na solidificação e por consequência permitem "copiar" o rotor para o estator.

A figura 15 mostra esquematicamente um mancal com estator moldado em resina.

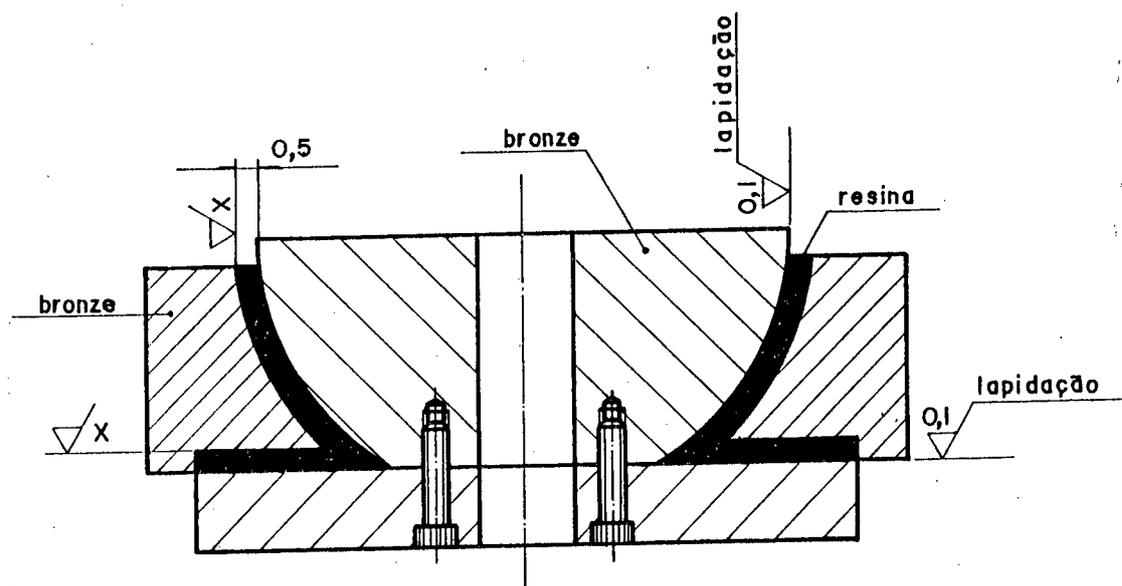


FIGURA 15 - Mancal semi-esférico/plano com estator moldado em resina.

Uma operação de lapidação posterior utilizando o próprio rotor como ferramenta, com grãos abrasivos com tamanhos apropriados, irá garantir a folga de trabalho desejada no estator. Operação semelhante, utilizando o disco como ferramenta, determina a folga no lado plano do mancal.

A solução do emprego da resina tem a vantagem adicional de possibilitar o estudo da influência de diferentes folgas do mancal sobre sua capacidade de carga e rigidez, uma vez que é possível se obter diferentes valores de folga, por lapidações sucessivas, com diferentes tamanhos de grãos, possibilitando a otimização do mancal. Após a retirada da resina e uma nova moldagem, a lapidação é feita para os valores de folga desejados.

Nesta técnica de fabricação os restritores de vazão também são moldados na própria resina, posicionando-se machos (fibras sintéticas) nas posições pré-estabelecidas, durante a operação de moldagem da calota.

3.1.1 Fabricação de um mancal semi-esférico/plano

a) Geração de semi-esferas em máquinas especiais

Existem vários processos de fabricação para se gerar uma superfície esférica. O processo depende da matéria-prima da peça a ser usinada, das tolerâncias dimensionais desejadas, das máquinas-ferramentas e ferramentas de corte utilizadas. Muitas vezes é necessária a utilização de dois ou mais processos de fabricação, como torneamento, lapidação e polimento, por exemplo.

Nas máquinas-ferramentas utilizadas para fabricação de peças esféricas, o movimento relativo entre a peça e a ferramenta

deve descrever a superfície desejada, sendo possíveis diferentes configurações, para as máquinas-ferramentas, dentre as quais destacamos [5,10,36,38,40,48]:

- Máquina com deslocamento "T"
- Máquina de contorno com deslocamentos perpendiculares da ferramenta ("stacked slideway")
- Máquina de contorno polar "R - θ "
- Geradora de arcos ("Chordal generator")
- Fresadora de ultraprecisão
- Torno de precisão para ferramenta de diamante

No anexo 5 apresenta-se resumidamente as características destas máquinas.

A maioria destas máquinas podem ser enquadradas na categoria de máquinas de precisão ou de ultraprecisão. Normalmente, são dotadas de uma base rígida e estável, térmica e mecanicamente, possuem mancais hidrostáticos ou aerostáticos para as guias e árvore principal, dispositivos pneumáticos para isolar vibrações, usam controladores de posicionamento para a peça e ferramenta. Muitas são comandadas numericamente (CNC), possuem sistemas laser para medição, transdutores piezelétricos e servo-posicionadores. Normalmente são instaladas em ambientes com controle de temperatura, de umidade, de limpeza e de vibrações. São fabricadas sob encomenda e possuem um custo elevado.

Analisando as configurações das máquinas geradoras de superfícies esféricas, observa-se que uma superfície esférica pode ser obtida, basicamente, através de duas operações distintas:

- pela superposição de dois movimentos circulares,
- pela superposição de um movimento circular e dois movimentos de translação interpolados.

Na geração de uma esfera pela superposição de movimentos circulares, é necessário que os eixos de rotação se cruzem. Pode-se usar tanto o processo de fresamento, onde a ferramenta executa o movimento de corte e a peça o de avanço, ou o processo de torneamento, onde a peça executa o movimento de corte e a ferramenta o de avanço.

3.1.2 Geração de semi-esferas em máquinas-ferramentas convencionais.

A geração de semi-esferas em máquinas-ferramentas convencionais obedece aos mesmos princípios das máquinas-ferramentas especiais. No entanto, em decorrência da menor precisão de movimento destas máquinas, o resultado obtido é de qualidade inferior.

Para minimizar os erros na fabricação de calotas semi-esféricas, foi efetuado um estudo da precisão de giro das máquinas-ferramentas disponíveis no Laboratório de mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina, optando-se por aquelas que apresentaram os menores erros. Foram selecionados a fresadora universal de ferramentaria Ruhla-FUW 250/IV [51], para a usinagem do rotor e calota semi-esféricos, e o torno horizontal ROMI I-20 [52], para a usinagem das formas planas e cilíndricas, cujas características técnicas estão resumidas no anexo 6.

A calota semi-esférica pode ser fabricada em uma fresadora universal convencional, ou em um torno. No estudo realizado por Vallejos [48] para a fabricação de calotas semi-esféricas, pelos processos de torneamento e fresamento, obtiveram-se os menores erros de forma e menor rugosidade para o torneamento.

A cavidade semi-esférica, onde será moldado o estator, deve apresentar uma rugosidade elevada para facilitar a adesão da resina na superfície. As tolerâncias da cavidade semi-esférica do estator podem ser muito abertas, uma vez que, posteriormente, parte de sua superfície será preenchido pela resina. Estes fatos possibilitam que a cavidade possa ser fabricada por torneamento ou fresamento, em máquinas-ferramentas convencionais.

Em ambos os processos, a geração da superfície esférica se dá pela superposição de dois movimentos de rotação, sendo um executado pela ferramenta de corte e o outro executado pela peça. No caso do fresamento o movimento de corte é executado pela ferramenta, fixada na árvore da fresadora, enquanto a ferramenta executa o movimento de avanço, fixada sobre uma mesa giratória. No torneamento, o movimento de corte é executado pela peça, enquanto a ferramenta executa o movimento de avanço.

Neste trabalho, para gerar uma superfície esférica por torneamento, a ferramenta é fixada em um suporte, montado sobre uma mesa rotativa, sendo a peça fixada em um suporte, montado na árvore de uma fresadora. Desta forma, dependendo da posição da ponta da ferramenta em relação ao seu centro de giro é possível gerar superfícies côncavas ou convexas, conforme representado na figura 16.

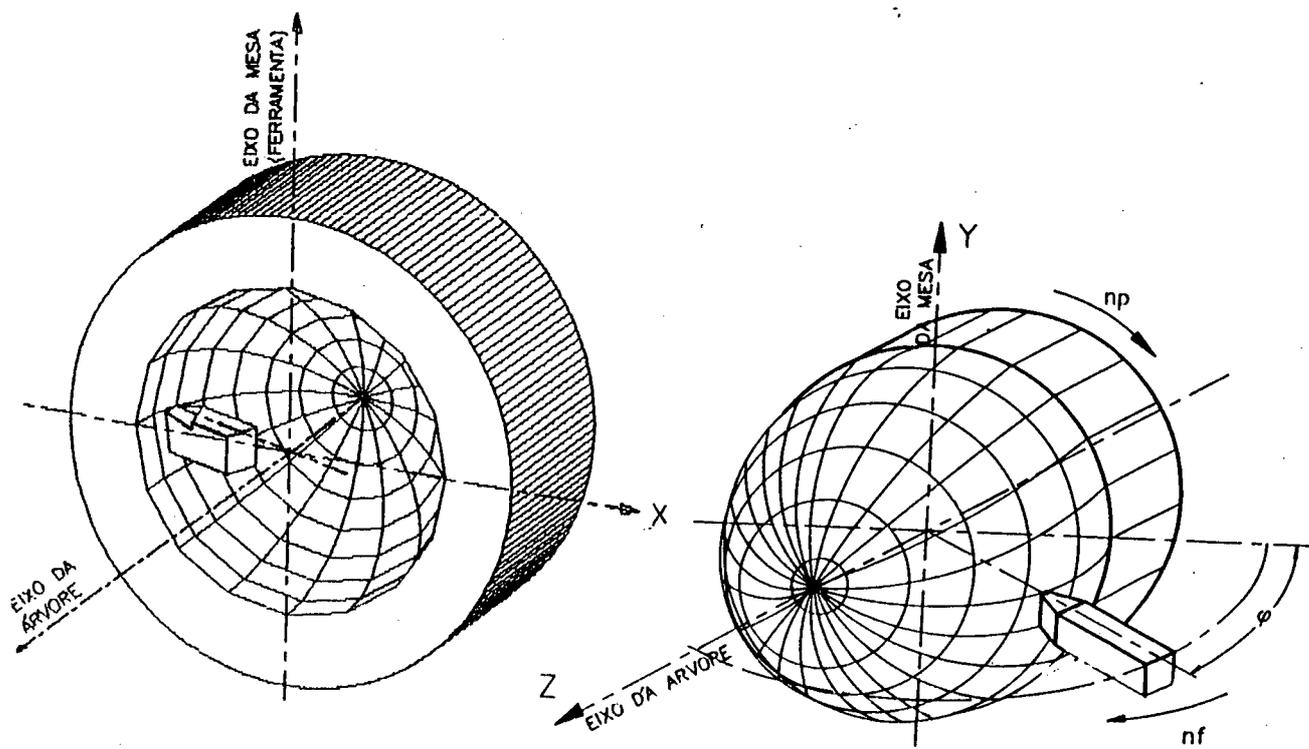


FIGURA 16 - Geração de superfícies esféricas côncavas e convexas, por torneamento.

Para gerar uma superfície esférica por fresamento, a peça é montada de forma centrada sobre uma mesa giratória e a ferramenta é uma fresa frontal (tipo copo) com corte externo, para geração de superfícies côncavas, e com corte interno, para geração de superfícies convexas. O diâmetro externo ou interno da ferramenta e sua inclinação em relação ao eixo de rotação da peça, definem o raio interno ou externo, respectivamente, da superfície que está sendo gerada, conforme mostra a figura 17.

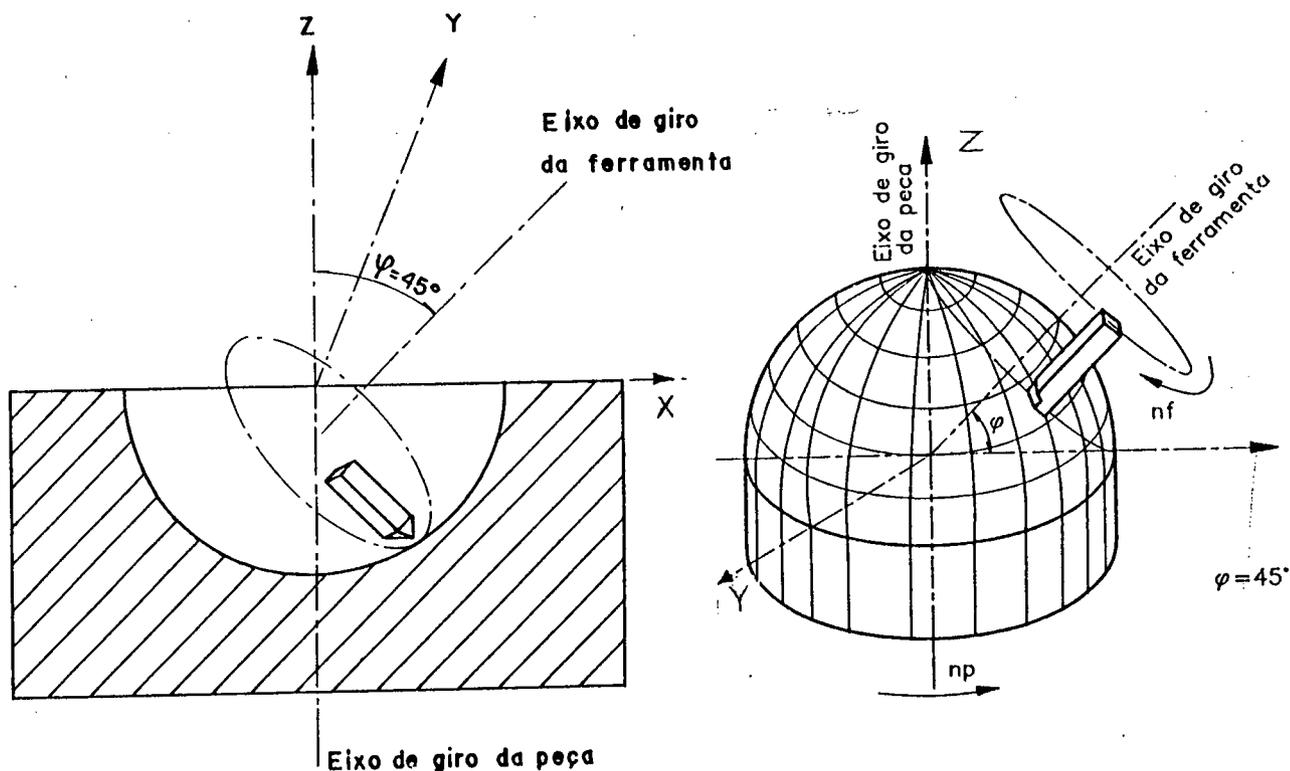


FIGURA 17 - Geração de superfícies esféricas côncavas e convexas, por fresamento.

a) Fabricação de calotas semi-esféricas, pelo processo de fresamento.

Na usinagem da calota semi-esférica por fresamento, a ferramenta, pode ser uma ferramenta de mandrilar, com diâmetro variável, o que facilita a obtenção de diferentes diâmetros.

O diâmetro D_e da superfície gerada depende do diâmetro da circunferência descrito pela ponta da ferramenta e do ângulo

de inclinação φ , formado entre os eixos de giro da ferramenta e da peça. Para uma inclinação de $\varphi = 45^\circ$ do eixo da árvore da fresadora, o diâmetro da ferramenta D_f é calculado pela relação:

$$D_f = R_e \cdot \sqrt{2} \quad (4)$$

Assim, teremos a ponta da ferramenta realizando um movimento circular, tangente à superfície esférica desejada. Com o movimento de rotação da peça em torno de seu eixo (movimento de avanço), teremos a superposição de várias circunferências, gerando uma semi-esfera convexa, como é ilustrado na figura 18.



FIGURA 18 - Fabricação da calota semi-esférica pelo processo de fresamento.

No entanto, a semi-esfera só será obtida caso haja intersecção entre o eixo de rotação da ferramenta com o eixo de rotação da mesa (peça). Um pequeno deslocamento do eixo de giro da ferramenta em relação ao eixo de rotação da peça, na direção y , implicará na formação de um sólido com formato achatado, para um desvio positivo, como o representado na figura 19-a, ou com um formato alongado, como o representado na figura 19-b, para um desvio negativo.

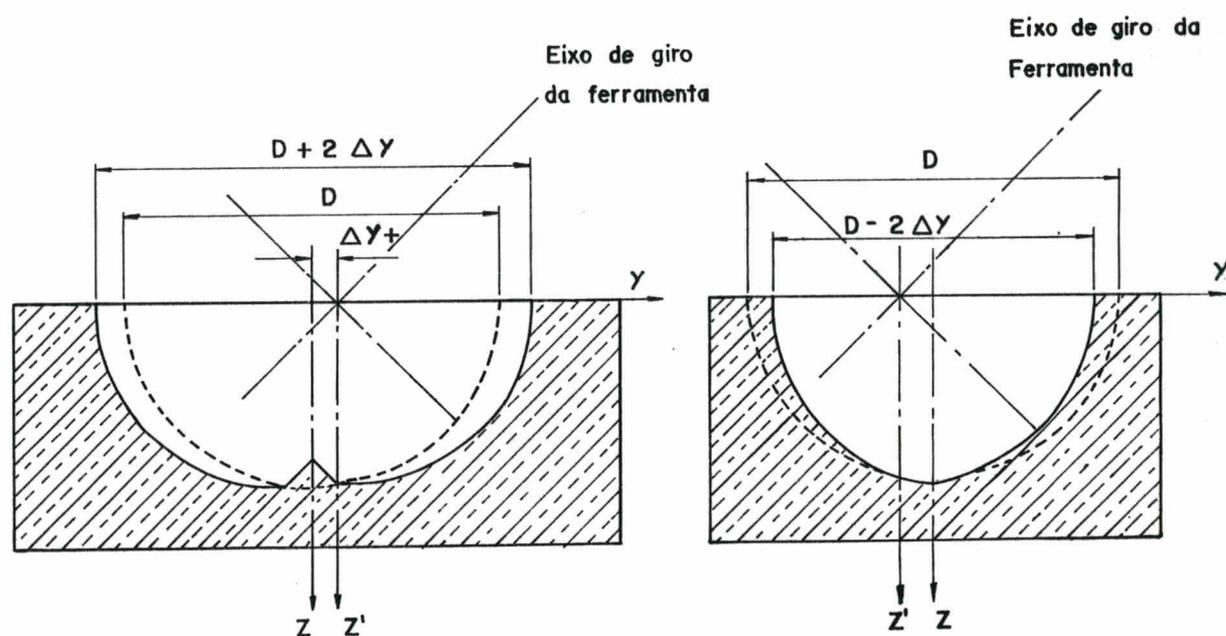


FIGURA 19 - Forma da superfície obtida devido à um deslocamento do eixo da ferramenta sobre o eixo y , no processo de fresamento [7,48].

Assim, o centro de rotação da ferramenta deve passar exatamente pelo centro da semi-esfera, a uma distância L , igual ao raio de giro da ferramenta R_e , ou seja:

$$L = R_e / \sqrt{2} \quad (5)$$

Neste processo, a velocidade de corte mantém-se constante, uma vez que o número de rotações e o diâmetro da ferramenta permanecem constantes. O avanço é máximo sobre a linha do equador da semi-esfera, diminuindo ao longo da esfera, até chegar a zero no polo da semi-esfera, gerando um cavaco em forma de cunha, com espessura máxima no equador, e mínima no polo.

Um deslocamento da ferramenta no eixo z provoca um deslocamento no centro da semi-esfera, sem alterar sua característica esférica, como ilustrado na figura 20.

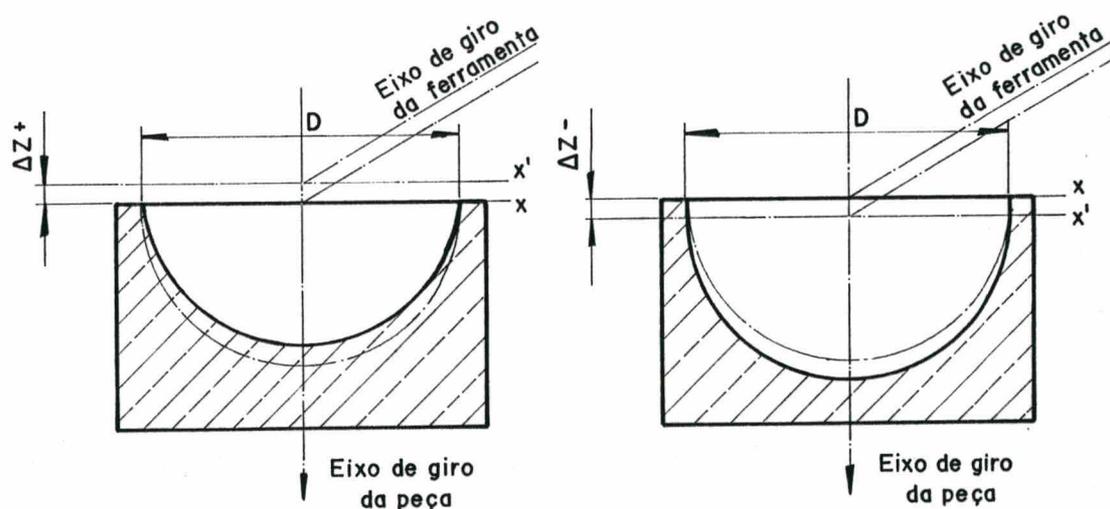


FIGURA 20 - Posição do centro da calota semi-esférica após um deslocamento da ferramenta na direção z , no fresamento.

Analisando o erro de posicionamento na direção do eixo y , para diversas superfícies de simetria rotacional, observa-se que caso haja coincidência entre os eixos de rotação da mesa e da ferramenta, haverá superposição dos movimentos circulares e a superfície gerada apresenta riscos que se cruzam, como mostrados na figura 21, detalhe a, facilitando a centragem visual da ferramenta.

O deslocamento do eixo de giro da ferramenta no sentido positivo de y provocará o aparecimento de riscos em apenas um sentido, como mostrado na figura 21, detalhe b, e no sentido negativo, riscos em sentido contrário, conforme está representado na figura 21, detalhe c.

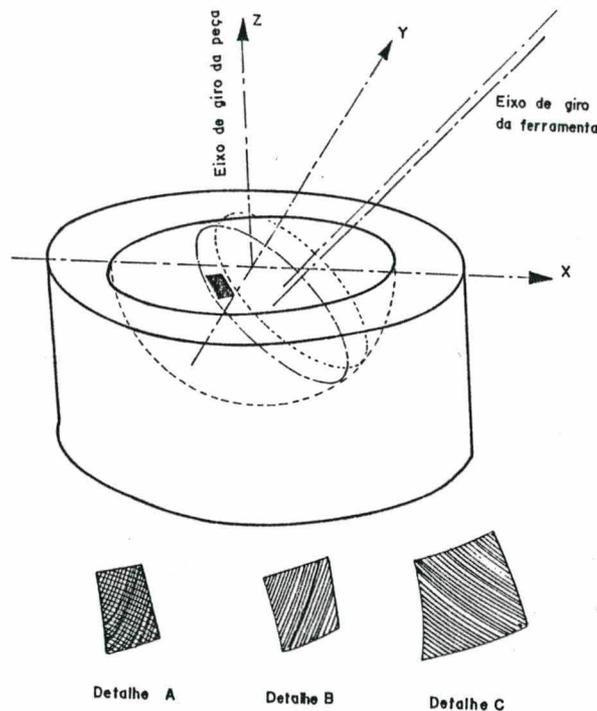


FIGURA 21 - Riscos na superfície semi-esférica, devido aos erros de posicionamento na direção y .

b) Fabricação do rotor semi-esférico pelo processo de torneamento.

No processo de torneamento a peça é fixada de forma centrada na árvore da máquina-ferramenta, executando o movimento principal de corte, enquanto uma ferramenta de torneiar monocortante é fixada sobre uma mesa giratória, executando o movimento de avanço, conforme esquematizado na figura 22.

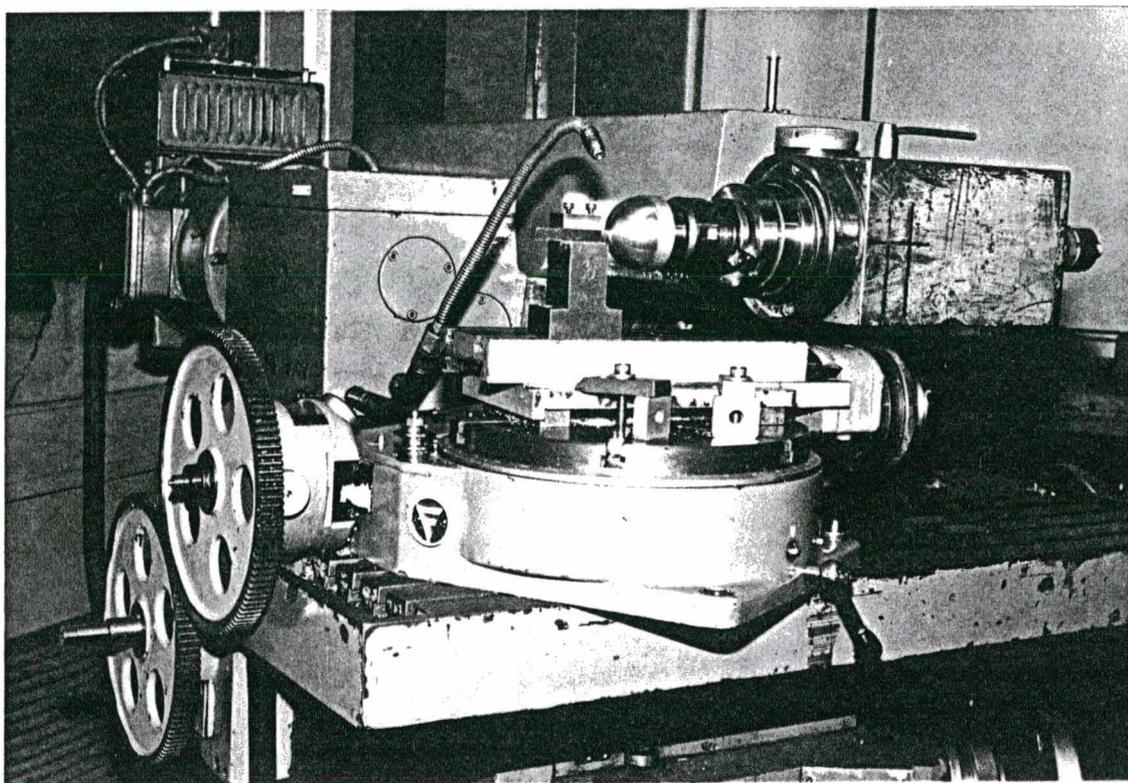


FIGURA 22 - Fabricação do rotor semi-esférico pelo processo de torneamento.

Para que seja gerada uma superfície esférica é necessário que haja coincidência entre o centro de rotação da semi-esfera e o centro de giro da ferramenta de corte.

No processo de torneamento a velocidade de corte se altera durante o deslocamento da ferramenta, apresentando um valor máximo, no equador, diminuindo até zero, no pólo da semi-esfera. Por outro lado, o avanço permanece constante, gerado um cavaco de seção constante, permitindo o preestabelecimento do acabamento superficial desejado.

Caso haja deslocamento do centro de giro da ferramenta em relação ao centro de rotação da peça, na direção do eixo x, no sentido positivo, teremos a geração de uma superfície com um ressalto no pólo da semi-esfera, quando a ferramenta efetua um giro de 90° no sentido horário, a partir do equador, conforme está ilustrado na figura 23-a. Girando a ferramenta além de 90° , haverá a remoção de material até que se atinja a posição do pólo, gerando-se assim uma superfície com um erro de esfericidade, de forma abaulada.

Sendo o erro de posicionamento na direção do eixo x, negativo, após um deslocamento de 90° , a superfície gerada terá uma forma "bicuda", como ilustrado na figura 23-b. Girando a ferramenta além de 90° , esta não encontrará material para remover, e o raio sobre a linha do equador é menor que o raio medido sobre o pólo.

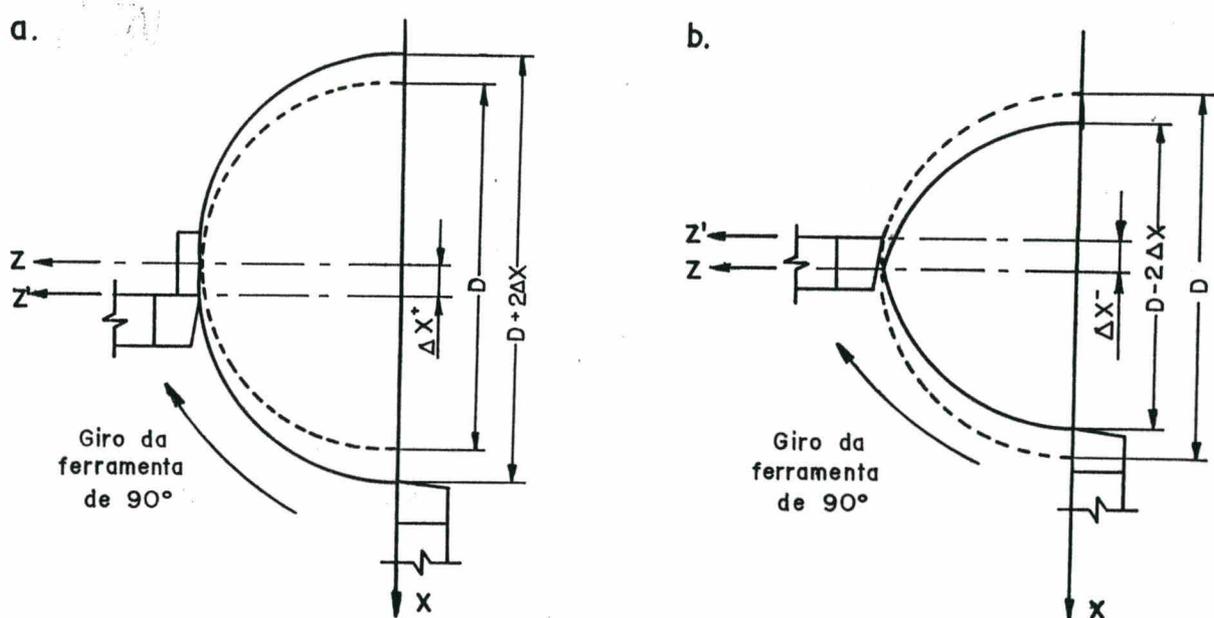


FIGURA 23 - Superfície obtida com deslocamento entre os eixos de giro, na direção do eixo x, no torneamento.

Havendo coincidência entre os eixos de rotação da peça e o eixo de giro da ferramenta na direção x, mas estando o centro de giro da ferramenta deslocado na direção z, no sentido positivo ou negativo, teremos apenas o deslocamento do centro da semi-esfera deslocado na direção positiva ou negativa do eixo z, como indicado na figura 24.

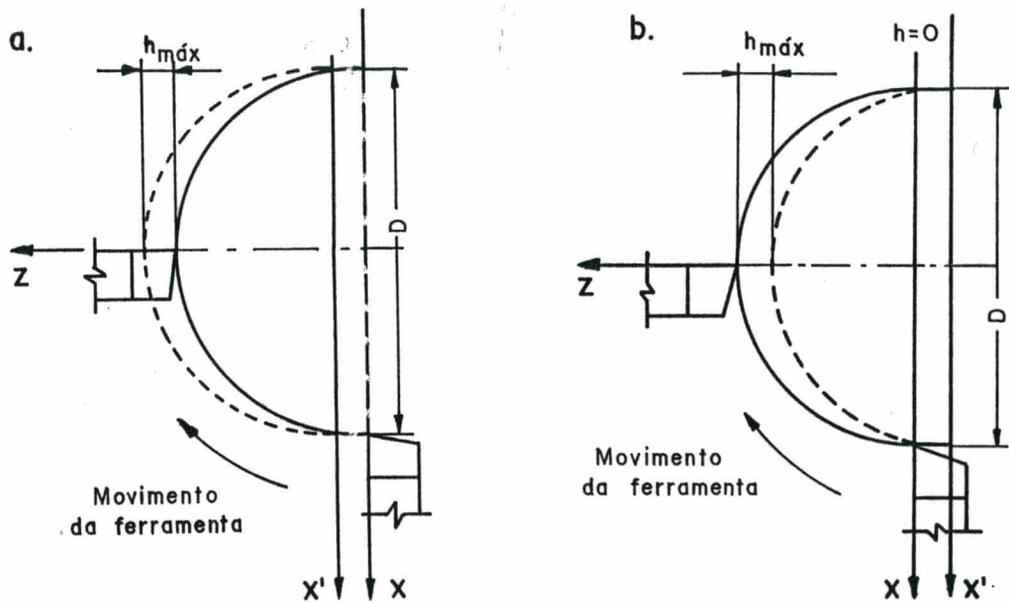


FIGURA 24 - Superfície obtida devido à um deslocamento na direção do eixo z , no torneamento.

Havendo deslocamento da quina da ferramenta na direção do eixo y , no sentido negativo, teremos uma semi-esfera com um ressalto cilíndrico com diâmetro de $2.\Delta y$, conforme está ilustrado na figura 25-a. Caso o deslocamento seja no sentido positivo, o ressalto varia conforme o ângulo de incidência da ferramenta, como mostrado na figura 25-b. Em ambos os casos, a semi-esfera

tem seu diâmetro aumentado, sendo o valor do diâmetro expresso pela equação:

$$D' = 2 \sqrt{(D/2)^2 + \Delta y^2} \quad (6)$$

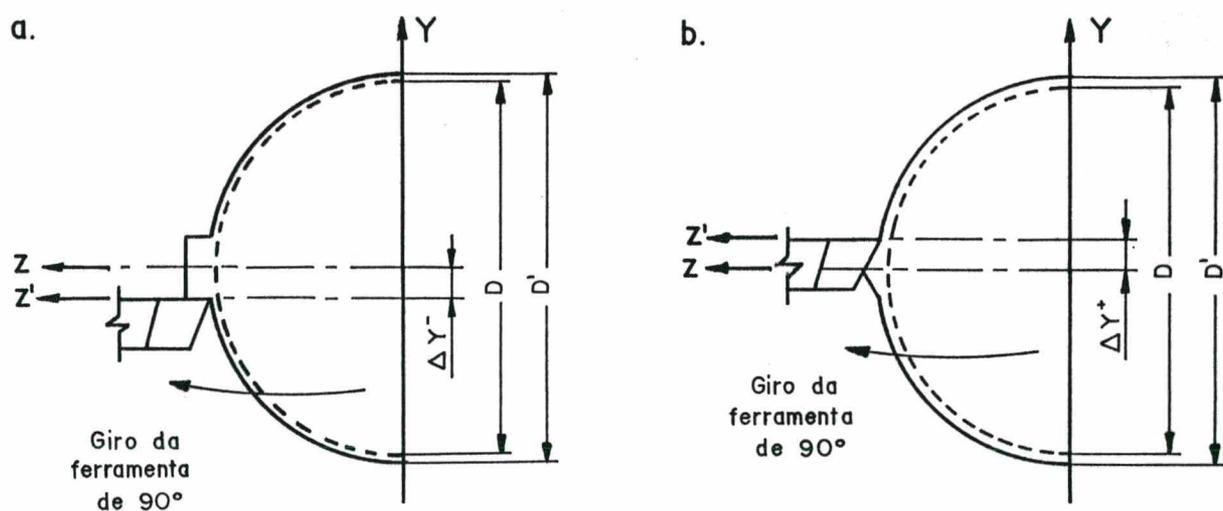


FIGURA 25 - Superfície obtida devido a um erro de deslocamento na direção do eixo y, no torneamento.

Uma superfície semi-esférica gerada por torneamento ou fresamento em máquinas-ferramentas convencionais permite a obtenção de erros de esfericidade da ordem de 5 μm e rugosidade R_a em torno de 0,4 μm , sendo portanto insuficientes para atender

as tolerâncias requeridas para o mancal aerostático semi-esférico projetado, que requer erros de esfericidade inferiores a $1 \mu\text{m}$ e rugosidade $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Para que se atinjam os valores desejados é necessário uma operação complementar de lapidação. Com esta finalidade, construiu-se um lapidador para o rotor semi-esférico, semelhante ao utilizado na indústria óptica, caracterizado por sua simplicidade e baixo custo, que será descrito, a seguir, no item 3.1.5.

c) Fabricação de superfícies planas por torneamento e por fresamento.

A fabricação das superfícies planas em máquinas-ferramentas convencionais leva a erros de fabricação que devem ser conhecidos e minimizados, de forma que possam satisfazer as tolerâncias dimensionais, de forma e acabamento superficial exigidos na fabricação dos componentes dos mancais aerostáticos.

No torneamento de faceamento, tem-se erros de ortogonalidade entre o eixo de rotação da peça e o deslocamento da ferramenta, realizado pelo carro transversal. Como consequência obtém-se uma superfície cônica, de forma "pontuda", conforme ilustrado na figura 26-a ou uma superfície cônica de forma "chanfrada", conforme ilustrado na figura 26-b.

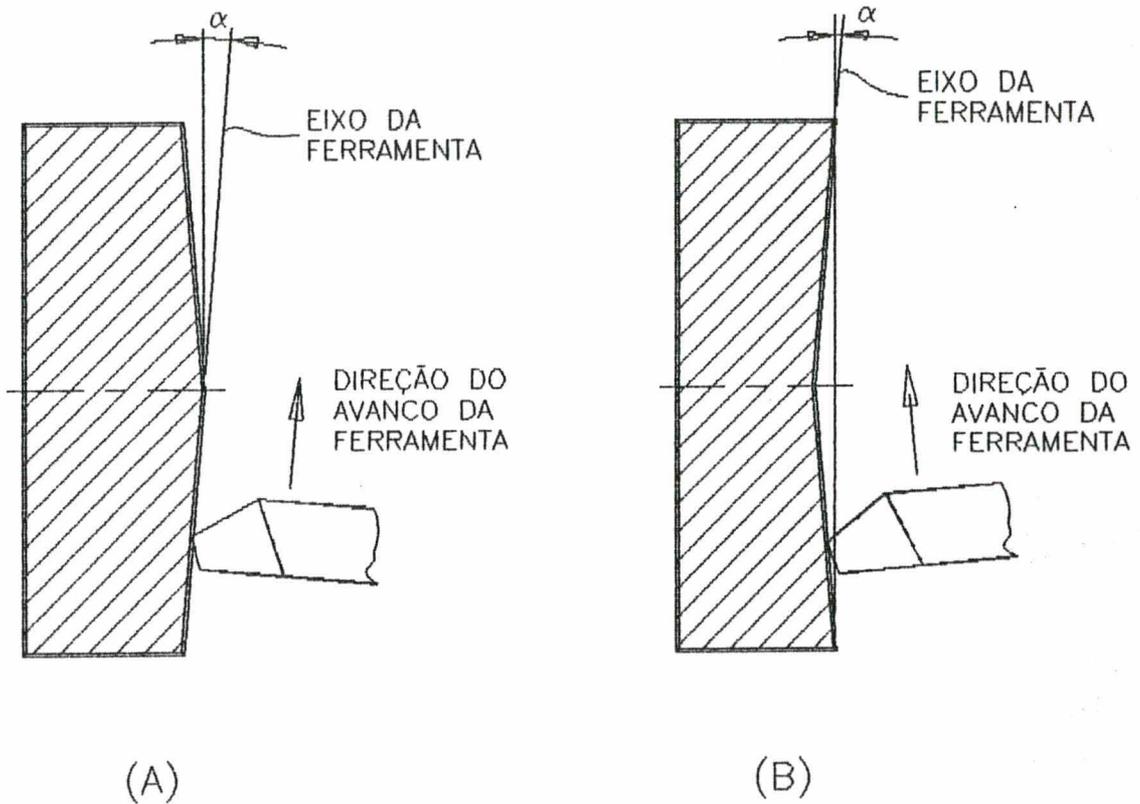


FIGURA 26 - Erro de forma em uma peça torneada com erro de ortogonalidade do movimento da ferramenta.

Verifica-se que a peça com forma da figura 26-b é mais indicada para a operação de lapidação plana, enquanto que a peça com forma da figura 26-a dificilmente permite uma correção pela lapidação plana, pois a mesma tomba em diversas direções, sem possibilitar o seu apoio na superfície do lapidador.

Erros de posicionamento da ferramenta acima ou abaixo da linha de centro de rotação da peça tem por consequência a formação de uma protuberância mamilar ou cilíndrica, semelhantes às obtidas na geração de superfícies esféricas por torneamento.

Na fabricação de superfícies planas pelo processo de fresamento, através de uma operação de fresamento frontal, só se

obtem uma superficie plana caso o eixo de rotaçao da ferramenta forme um angulo reto com a superficie da mesa. Neste caso, a superficie apresenta um acabamento com riscos cruzados. Qualquer inclinacao do eixo de rotaçao da ferramenta provoca uma deformacao da superficie das peças usinadas, resultando numa superficie ondulada como a mostrada na figura 27, apresentando acabamento com riscos em forma de virgula.

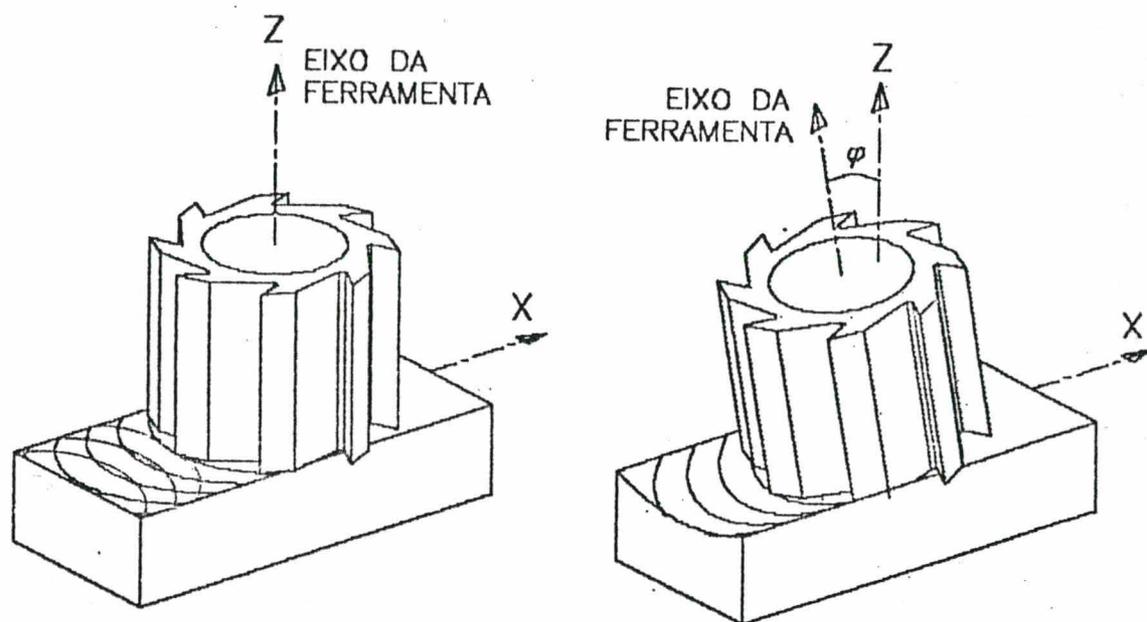


FIGURA 27 - Erro de forma de uma superfície fresada com erro de ortogonalidade entre o eixo de giro da ferramenta e a superfície da mesa.

3.1.3 Equipamentos para a fabricação e análise experimental

Os equipamentos utilizados durante os experimentos são os existentes no Laboratório de Máquinas-Ferramentas e de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina.

Naturalmente se faz necessário o apoio de outros Laboratórios da U.F.S.C, principalmente para a medição de alguns componentes e/ou variáveis, quando são utilizados equipamentos do Laboratório de Metrologia.

a) Máquinas-ferramentas

A maioria dos elementos constituintes do mancal aerostático semi-esférico/plano, bem como os dos mancais radiais, são fabricados através de operações convencionais de torneamento, furação, fresamento e retificação, com a preocupação extra de considerar e minimizar os efeitos dos fatores que atuam sobre os processos de fabricação, tais como temperatura ambiente, rigidez da ferramenta e da peça, características da matéria-prima, seleção da ferramenta, e condições de usinagem. Sempre que necessário, são projetados dispositivos de fixação para a peça e ferramenta, que minimizem as vibrações e deformações ou facilitem a fabricação.

As luvas dos mancais radiais, durante toda sua usinagem, são fixadas de maneira idêntica à da bancada de ensaios, onde serão utilizados, com o intuito de evitar os efeitos de tensões residuais. Após o mandrilamento dos furos, estes serão brunidos, com o objetivo de obter a conicidade de

1:10.000, melhorar o acabamento superficial e diminuir o erro de circularidade.

A confecção dos restritores, com diâmetros de 1,0 mm, são efetuados diretamente no corpo do mancal, com brocas de aço rápido. Os restritores com diâmetros de 0.18 mm são confeccionados durante a moldagem dos mancais, utilizando-se a técnica de moldagem de microfuros. Para se obter parâmetros de comparação que possibilitem analisar a eficiência desta técnica, confecciona-se estes restritores também em bujões, como é usual, utilizando-se brocas de 0,2 mm de diâmetro. Para esta operação, utiliza-se um torno horizontal dotado de uma árvore com boa rigidez e baixa vibração. No entanto, apresenta o inconveniente de possuir uma rotação máxima de 2800 min^{-1} . Este torno não dispõe de avanço automático para o cabeçote móvel. Para possibilitar um avanço de aproximadamente 0,001 mm por rotação, é instalado um relógio comparador, com resolução de 0,001 mm, no mangote do cabeçote móvel, sendo o avanço executado manualmente. Esta operação exige muita habilidade do operador.

Para a lapidação das superfícies planas e esféricas foram projetados e construídos máquinas específicas:

- Lapidador para superfícies planas.

O dispositivo, projetado e construído no Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina, consiste em um disco de trabalho rotativo de ferro fundido com 400 mm de diâmetro. Na parte central do disco uma engrenagem motora, no centro do disco, aciona as gaiolas dentadas, nas quais

são colocadas as peças a serem lapidadas. O movimento das gaiolas é limitado por uma engrenagem de pinos, alojada na periferia da estrutura da máquina, de modo que elas executam um movimento planetário em torno do disco de trabalho e outro de rotação em torno de seu centro.

A figura 28 mostra o lapidador para superfícies planas, utilizado neste trabalho.

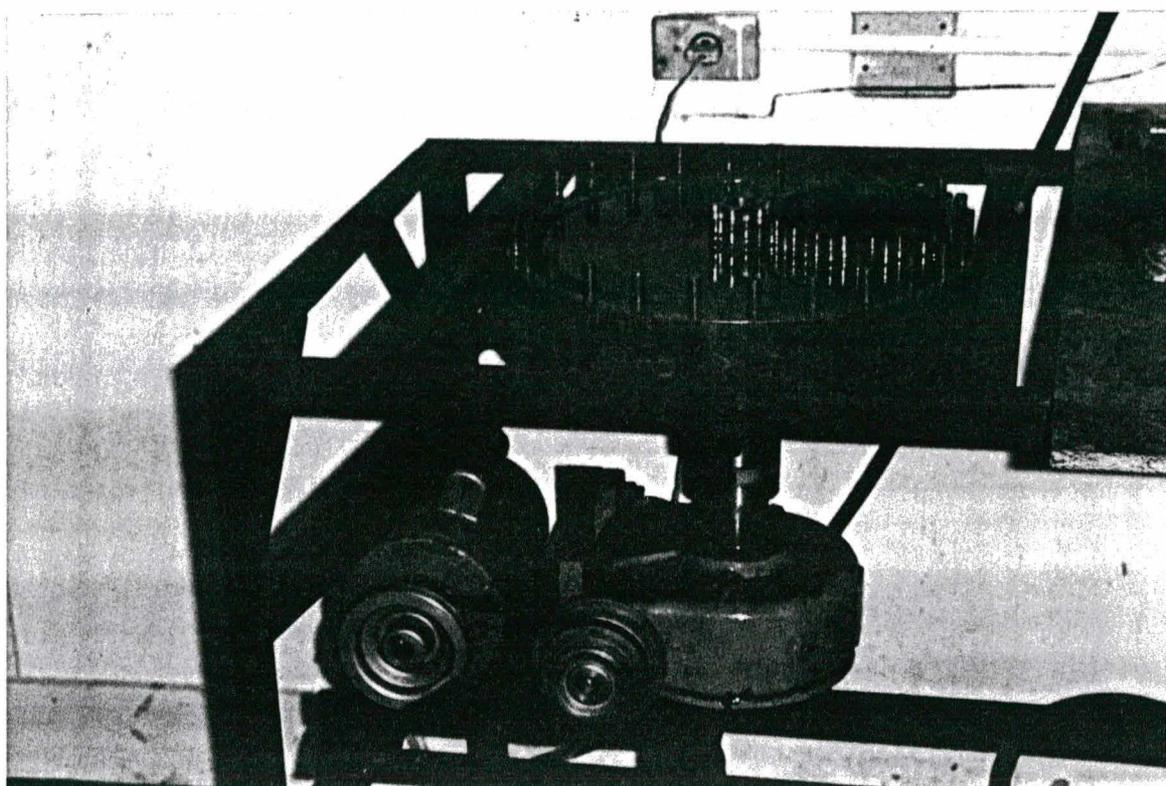


FIGURA 28 - Lapidador para superfícies planas.

- Lapidador para superfícies esféricas

A lapidação de esferas exige que a peça e a ferramenta executem movimentos circulares. A superposição de dois movimentos circulares tem por consequência a descrição de uma superfície esférica.

Para minimizar os erros de esfericidade na peça, a ferramenta, além do movimento de rotação, tem liberdade de movimentos pendulares aleatórios. Neste caso estes movimentos são executados manualmente.

Para a lapidação do rotor, a ferramenta de lapidar apresenta um raio menor que o raio do rotor, contendo várias estrias sobre a região de contato, com o objetivo de realimentar o meio de lapidação para a região de trabalho. Como a largura da região de contato é estreita, esta rapidamente se adapta ao raio da peça, tendo-se assim, condições otimizadas de lapidação.

A ferramenta de lapidação pode ser acionada de forma independente, ou ser transportada automaticamente pela peça (pela diferença das velocidades tangenciais na linha de contato entre peça e ferramenta). A figura 29 mostra a montagem do lapidador, com os respectivos movimentos. Nesta montagem, o rotor semi-esférico é montado na placa de um torno enquanto a ferramenta de lapidar é fixada numa furadeira manual, sendo sua movimentação pendular, executada manualmente.

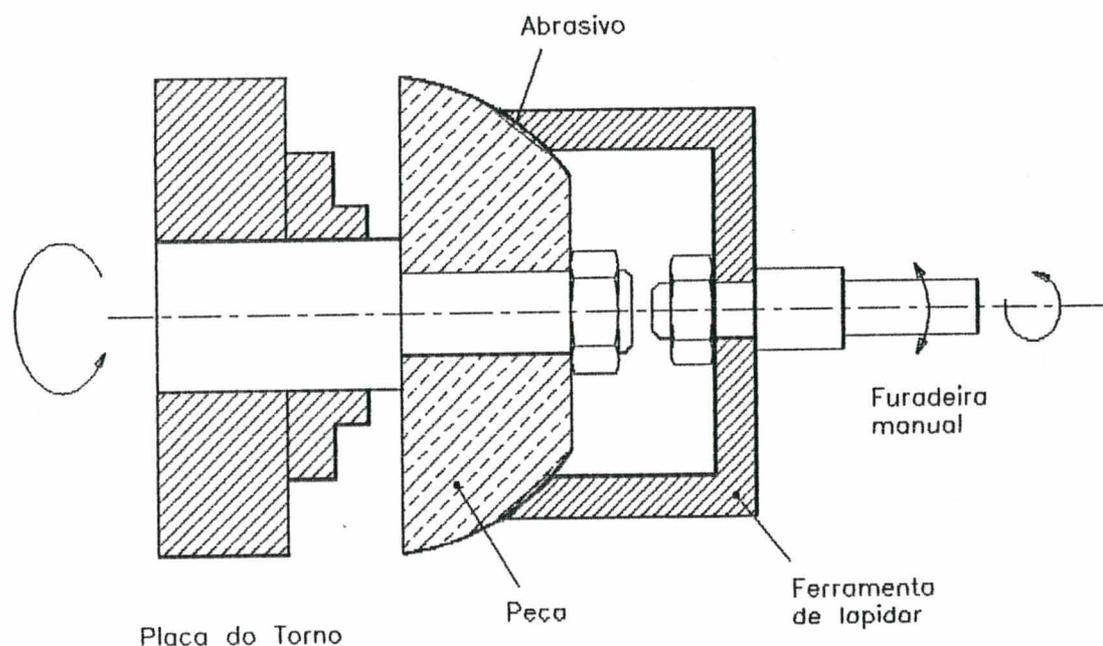


FIGURA 29 - Lapidador para superfícies esféricas.

b) Sistemas de medição

Além das medições de fabricação com paquímetro e micrometro, em algumas das peças do mancal aerostático exige-se medições complementares.

Para medir a circularidade, é utilizado um circularímetro, modelo Formteer MM Q2/ Macrograf F 1 A, com plotter, com resolução de $0,1 \mu\text{m}$.

Para a medição do raio e da esfericidade do rotor e da calota esférica, é utilizada uma máquina de medir por coordenadas

da Carl Zeiss, cuja resolução é de $0,2 \mu\text{m}$, com incerteza de medição de $\pm 1,5 \mu\text{m}$.

A rugosidade das peças é medida em um rugosímetro, modelo Perthometer M 3 A, da Feinpruef GmbH.

Para a centragem das peças na árvore ou na mesa rotativa, são utilizados relógios comparadores com resolução de $0,01 \text{ mm}$ e $0,001 \text{ mm}$.

Para a medição do deslocamento nos ensaios para determinação das curvas de deslocamento $h \times$ carga W , é utilizado um sistema de medição da marca MicroEpson, com incerteza de medição de $0,1 \mu\text{m}$, composto de um transdutor indutivo sem contato, unidade para tratamento de sinal, acoplados à um sistema de aquisição de sinais, HP 3947 com voltímetro digital e microcomputador da Hewlett Packard, HP 85.

c) Unidades purificadoras de ar comprimido

O ar comprimido, proveniente de um compressor, utilizado para o suprimento de ar nos mancais aerostáticos deve ser limpo, seco e isento de óleo.

Com esta finalidade, foi instalada uma unidade purificadora de ar comprimido, da Domnick Hunter, modelo DPR 5021, constituída de uma unidade secadora de ar, por arrefecimento, e duas unidades de filtragem de ar, uma com grau A0 para retenção de partículas até $1 \mu\text{m}$ e eventual remoção da água condensada e do óleo até o residual de $0,5 \text{ ppm}$, e outra de grau AA, para retenção de partículas até $0,01 \mu\text{m}$ e remoção de óleo até o residual de $0,01 \text{ ppm}$. A figura 30 mostra a

configuração do sistema.

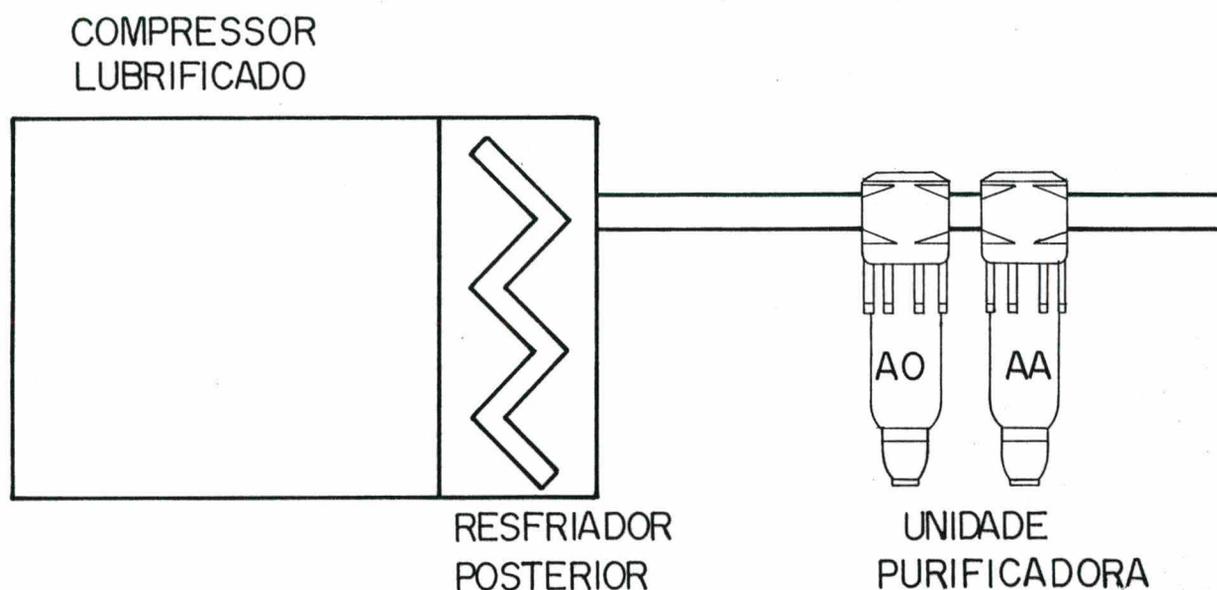


FIGURA 30 - Sistema de purificação de ar para os mancais.

Para garantir o suprimento contínuo do ar, é instalado um reservatório de ar, complementar, entre o compressor e a unidade de purificação do ar. No caso da falha do compressor, uma válvula de retenção impede que o ar retorne para o reservatório principal, sendo assim possível reconhecer a diminuição da pressão no reservatório principal e tomar as precauções necessárias, antes que os mancais aerostáticos sejam danificados. A tubulação do sistema de ar comprimido deve ser limpa e resistente à corrosão, tendo-se optado pela instalação da rede com tubos de aço inox. Em cada tomada de ar é instalado um filtro com regulador de pressão e indicação da pressão de saída.

d) Dispositivo para aplicação de forças

A aplicação de forças no mancal aerostático para determinação de sua capacidade de carga estática é efetuada através de um dispositivo com braços de alavanca horizontais. O carregamento do dispositivo é efetuado com massas calibradas. A aplicação da força sobre o mancal se dá através de um pino de ponta esférica. A ampliação da força no dispositivo é de 6,56 vezes.

A figura 31 mostra a aplicação deste dispositivo durante um ensaio para a determinação da rigidez do mancal semi-esférico/plano.

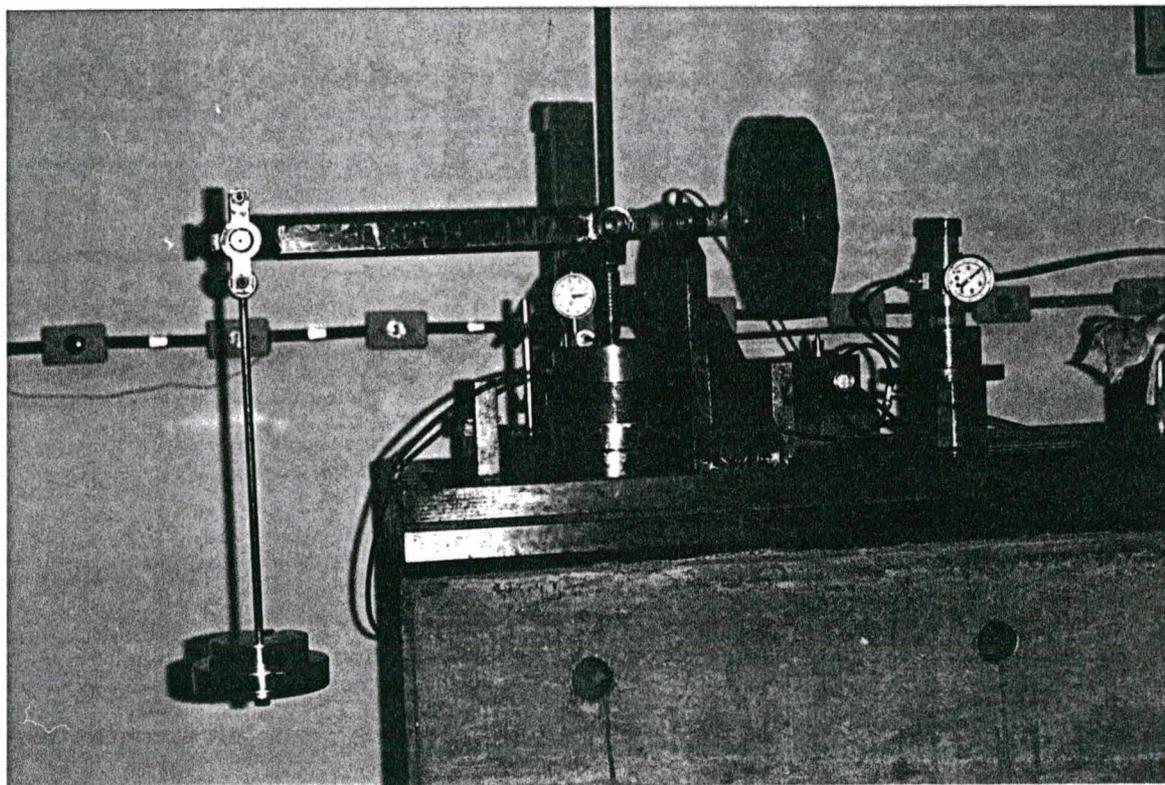


FIGURA 31 - Dispositivo para aplicação de forças, durante um ensaio de capacidade de carga.

Uma segunda forma de testar a capacidade de carga do mancal aerostático semi-esférico/plano é pela aplicação de cargas diretamente suspensas no mancal, conforme mostrado na figura 32.

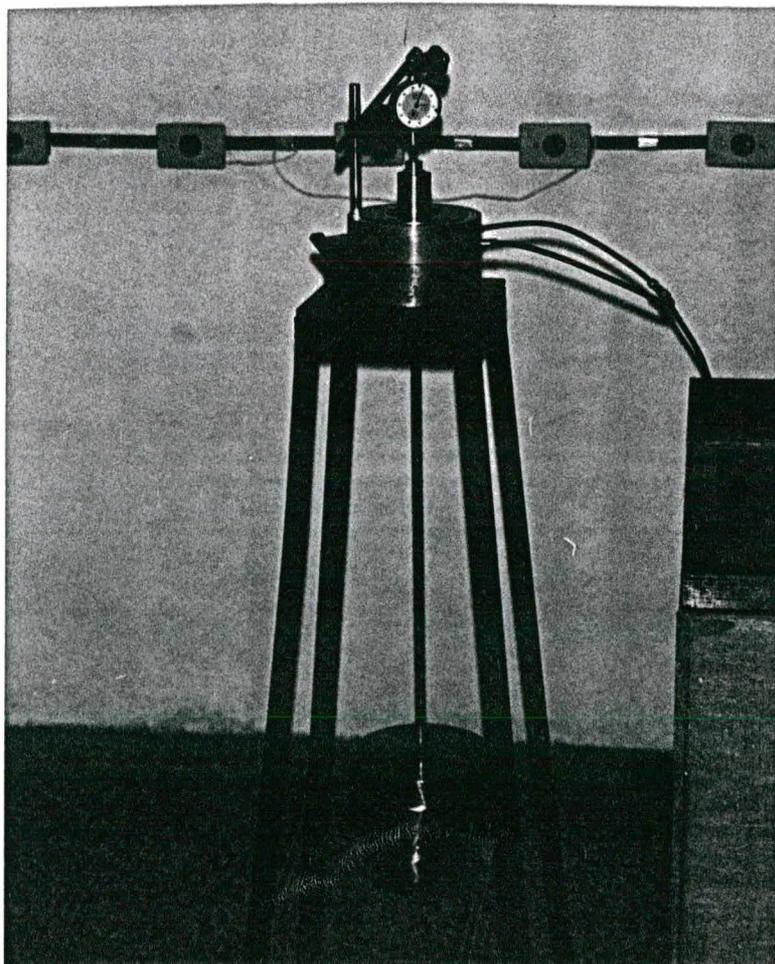


FIGURA 32 - Bancada de ensaios para os mancais semi-esféricos/plano.

O mancal é alojado na placa superior, sendo as massas calibradas aplicadas através de um pêndulo apoiado na superfície superior do mancal. Apesar de que neste dispositivo necessita-se de mais massas para a determinação das características do mancal, ele apresenta a vantagem de o mancal permanecer livre para a

rotação durante os ensaios, de forma que o colapso do filme de ar pode se reconhecido mais facilmente.

e) Manuseio e limpeza dos componentes

Um dos problemas mais sérios na fabricação dos componentes dos mancais e peças de precisão em geral, diz respeito à limpeza e manuseio dos mesmos, antes, durante e após sua usinagem. Devido ao alto grau de acabamento superficial das superfícies, mesmo adotando-se os cuidados tradicionais de limpeza e manuseio, é difícil eliminar resíduos de abrasivos, principalmente nos furos com roscas e restritores, ou evitar os riscos, provenientes do contato entre as peças. O simples contato manual com as peças, provoca a contaminação com ácido úrico das mãos do operador, atacando a superfície usinada.

Para garantir uma limpeza adequada, as peças são imersas em um banho de detergente e limpas por ultra-som, por vinte minutos. Após a limpeza, as superfícies de montagem não podem mais ser tocadas.

3.1.4 Fabricação dos restritores de vazão por moldagem

Os restritores de vazão podem ser obtidos diretamente durante a confecção do mancal semi-esférico através da técnica de moldagem de micro-furos, em aperfeiçoamento no Laboratório de Mecânica de Precisão da U.F.S.C..

Neste processo, machos com diâmetro de 0,18 mm são cuidadosamente posicionados em furos com 1 mm de diâmetro,

previamente executados, sendo os mesmos apoiados em um anel de cobre com diâmetro aproximado de 0,5 mm.

Após a colocação dos machos faz-se uma operação de verificação para evitar que algum furo fique sem seu respectivo macho, e um ajuste dos mesmos em suas posições.

Após as operações de desmoldagem e lapidação para obtenção da folga, procede-se a operação de retirada dos machos removíveis. Isto será efetuado com uma pinça de dentista, tracionando-se, com cuidado, os machos para cima.

3.1.5 Moldagem da calota semi-esférica e lado plano do mancal semi-esférico/plano.

Após a fabricação do rotor pelo processo de torneamento ou fresamento descritos anteriormente, espera-se obter erros de esfericidade em torno de $5 \mu\text{m}$ e rugosidade R_a em torno de $0,6 \mu\text{m}$.

Como estes valores são incompatíveis com os valores desejados, o rotor será submetido a uma operação de lapidação, usando a ferramenta de lapidação descrita no item 3.1.3, figura 39, utilizando-se como meio de lapidação pastas de diamante com granulometria variando de 1 a $9 \mu\text{m}$.

Com esta operação é possível reduzir os erros de esfericidade para valores próximos a $1 \mu\text{m}$ e a rugosidade R_a em torno de $0,1 \mu\text{m}$. Procedimento idêntico deve ser adotado para o disco plano, no lapidador de superfícies planas, descrito no item 3.1.3.

Para proporcionar uma maior aderência da resina, a calota semi-esférica e seu lado plano serão fabricados com um

avanço grande e ferramenta de ponta cônica, de modo a se obter uma superfície bastante rugosa.

Após a colocação dos machos, como descrito anteriormente, procede-se à colocação da resina. Isto será feito espalhando-se a resina com uma espátula sobre a superfície semi-esférica da calota, deixando uma camada superior à folga inicial e também sobre a superfície plana da calota.

Deve-se executar esta operação de modo a não retirar os machos de suas posições.

Em seguida, a calota será apoiada sobre o disco, enquanto o rotor será colocado de forma centrada sobre a calota, sendo pressionado contra a mesma através de parafusos, colocados no disco plano. Com o aperto, o rotor e o disco irão espalhar o excesso de resina para as extremidades.

Após a cura da resina, o rotor e o disco são desmoldados, e obtém-se uma superfície semi-esférica com a mesma forma do rotor e uma superfície plana com a mesma planicidade do disco.

3.1.6 Obtenção da folga do mancal, por lapidação.

Após a operação de desmoldagem, a folga do mancal semi-esférico será obtida através de uma operação de lapidação, utilizando o próprio rotor como ferramenta e pasta de diamante com tamanhos de grãos pré determinados em função da folga desejada.

Esta operação será executada manualmente através do deslocamento com movimento de rotação e basculamento do rotor em

todas as direções, observando para que haja uniformidade dos mesmos.

Operação idêntica será efetuada no lado plano, utilizando o disco como ferramenta para lapidar a superfície plana da calota.

Após uma limpeza rigorosa das peças, executa-se uma operação de medição dos diâmetros, esfericidade, folgas e rugosidade do rotor e da calota, aplicando-se nova operação de lapidação para os ajustes necessários, até que se atinjam os valores com as tolerâncias pré-estabelecidas.

CAPÍTULO 4

OTIMIZAÇÃO DE MANCAIS AEROSTÁTICOS
PELO PROCESSO DE MOLDAGEM

A otimização de mancais aerostáticos é efetuada, conjugando-se os dados de projeto com os resultados práticos da fabricação. Como o projeto é realizado prevendo dimensões e formas geométricas ideais, mas com a fabricação obtém-se dimensões e formas reais diferentes, visto que a fabricação sempre está associada a erros, é necessário determinar até que ponto estes erros interferem no funcionamento e nas características dos mancais aerostáticos.

Para otimizar a fenda do mancal aerostático radial, Stoeterau [52] desenvolveu um ensaio, no qual o mancal era composto de uma luva e um cilindro, ambos com uma conicidade de 1:10.000, montados em uma bancada de ensaios conforme mostrado na figura 33. A variação da posição da luva ao longo do eixo cilíndrico permite uma avaliação da fenda do mancal na faixa de 0 a 50 μm . Nestes ensaios foram empregadas luvas usinadas, com orifícios de 1 mm de diâmetro, e luvas moldadas, com orifícios de 0,18 mm de diâmetro (diâmetro do inserto utilizado na moldagem).

Determinou-se a rigidez estática e dinâmica, a capacidade de carga, a excentricidade, as frequências críticas e o tempo mínimo de estabilização, em função da folga, da pressão de alimentação, das relações geométricas, do número, posição dos restritores, comparando-se os resultados obtidos nas luvas obtidas por usinagem, com uma operação de mandrilamento, seguido

de uma operação de brunimento e luvas obtidas por moldagem com resina.

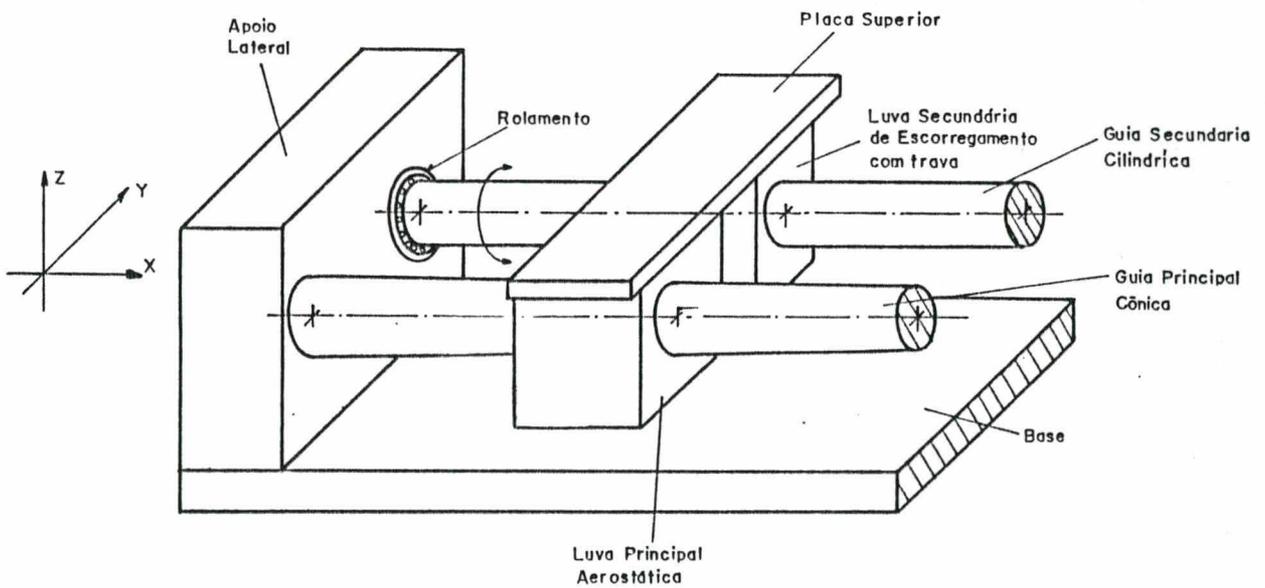


FIGURA 33 - Bancada de ensaios para mancais radiais.

A bancada se constitui basicamente de duas guias: o eixo principal cônico, com 85 mm de diâmetro e conicidade de 1:10.000, e um eixo secundário cilíndrico de 35 mm de diâmetro, montados de forma paralela em uma estrutura rígida de ferro fundido.

A guia secundária é montada de forma rotulada sobre rolamentos, permitindo o giro sobre o seu eixo longitudinal e sobre ela desliza uma luva de escorregamento, dotada de trava.

Para evitar a rotação da luva aerostática na posição de ensaio, ela é acoplada à luva de escorregamento do eixo secundário, de forma que se tenha apenas um grau de liberdade na posição de ensaio, como mostrado na figura 34.

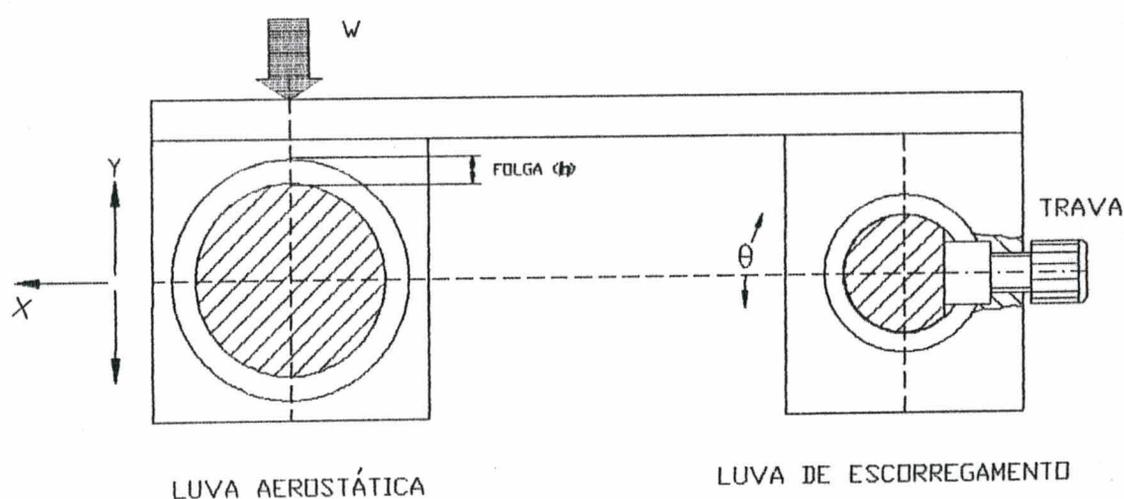


FIGURA 34 - Representação esquemática da montagem da luva aerostática.

Como as folgas dos mancais aerostáticos são pequenas, o movimento de rotação em torno do eixo secundário é pequeno, pode-se desprezar os deslocamentos da luva aerostática na direção do eixo x .

As luvas aerostáticas ensaiadas apresentam relação comprimento/diâmetro igual a: $L/D = 1$; $L/D = 1,5$ e $L/D = 2$, e são alimentadas por uma ou duas fileiras de oito restritores. Os diâmetros dos restritores ensaiados são de 0,18 e 1,0 mm.

A figura 35 mostra uma luva ensaiada, fabricada pelo processo de moldagem.

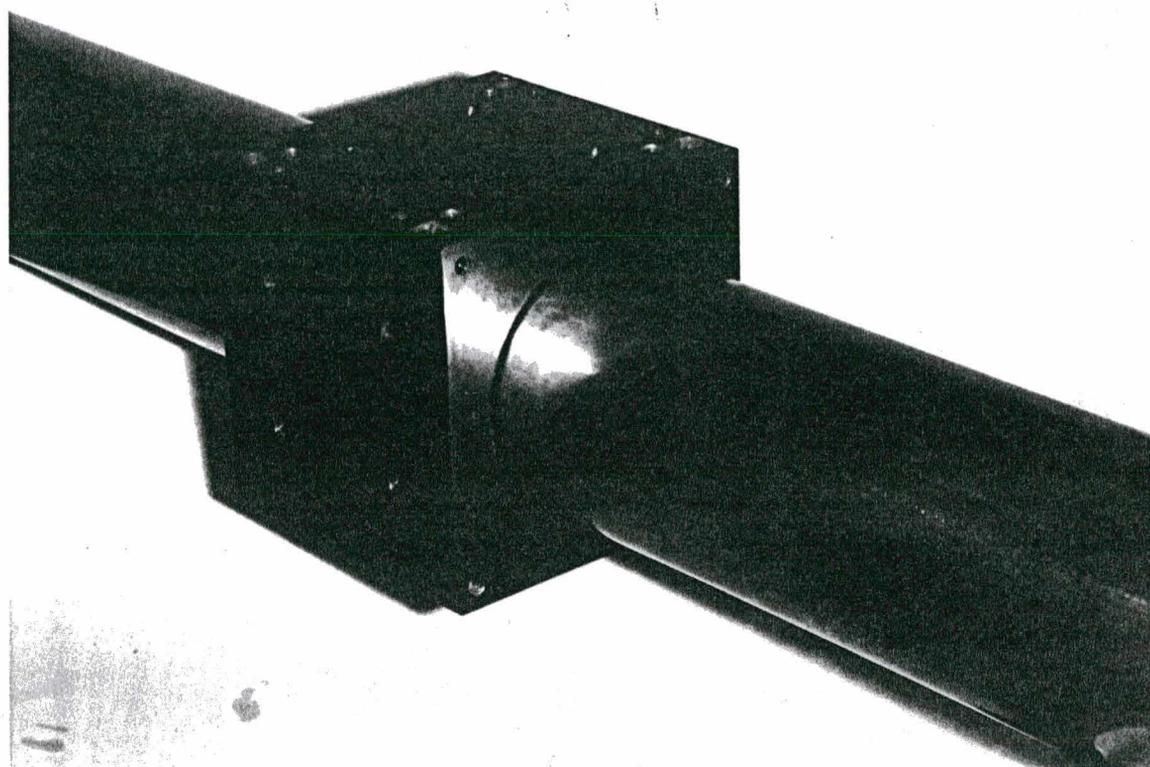


FIGURA 35 - Luva aerostática radial, fabricada pelo processo de moldagem.

Através do deslocamento da luva aerostática principal sobre o eixo principal, tem-se a possibilidade de variar a folga diametral de trabalho do valor zero até 50 μm .

Fixando-se a luva secundária na posição que forneça a folga de trabalho desejada, pode-se aplicar cargas sobre o mancal (luva) aerostático, através de massas previamente calibradas, medindo-se o deslocamento da luva, através de um transdutor de deslocamento indutivo, podendo-se, então, determinar a capacidade de carga e a rigidez estática do mancal.

Medindo-se o deslocamento da luva do mancal para cada carga aplicada, obtém-se a curva deslocamento \times carga, permitindo o cálculo da rigidez do mancal para uma determinada folga.

O eixo do mancal, eixo principal da bancada, é fabricado através dos processos de torneamento cilíndrico, seguido de uma operação de retificação cônica, com que se obtém uma conicidade de 1/10.000.

As luvas aerostáticas para os ensaios são fabricadas através de dois processos distintos, sendo usinagem e moldagem, com o objetivo de se comparar os mesmos do ponto de vista da precisão dimensional, precisão de forma e acabamento superficial.

Para fabricar as luvas por usinagem, elas são inicialmente mandriladas com um diâmetro 0,05 mm menor que o diâmetro menor do eixo e, posteriormente, através de uma operação de brunimento cônico, deve-se obter um cone interno com o diâmetro maior igual ao diâmetro máximo do eixo, possuindo a mesma conicidade do eixo.

Para fabricar a luva pelo processo de moldagem,

inicialmente se efetua um mandrilamento cilíndrico na luva, deixando-a com um diâmetro de 0,8 mm maior que o diâmetro maior do eixo. Em seguida, utilizando o eixo cônico do mancal como macho, a luva é moldada com resina, próximo à extremidade de maior diâmetro do eixo. Após a cura da resina a luva é desmoldada do eixo, obtendo-se assim na luva do mancal, a mesma conicidade do eixo.

Os mancais são construídos com restritores sem rebaixo, com diâmetros de 1,0 mm e 0,18 mm, para que se possa analisar também a influência do diâmetro do restritor sobre a capacidade de carga e rigidez do mancal. Os restritores com diâmetro de 1,0 mm são construídos com furação direta no mancal, através do processo de furação, com brocas. Os restritores com diâmetro de 0,18 mm são confeccionados na resina, durante a moldagem da luva do mancal, através da técnica de moldagem de microfuros. Para tal, são executados furos de 1 mm de diâmetro na luva do mancal, nos quais são colocados machos de fibra sintética, com diâmetro de 0,18 mm, guiados através de um dispositivo de posicionamento.

Após a fabricação das luvas aerostáticas moldadas, efetuam-se as medições das dimensões, forma e rugosidade, com a finalidade de compara-los com os resultados obtidos pelo processo de brunimento.

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Capacidade de Carga do Mancal Semi-Esférico/Plano

Os gráficos das figuras 36 mostram a variação da folga do mancal semi-esférico/plano quando foram aplicadas cargas no lado esférico, para pressões de suprimento de 2, 3, 4 e 5 bar, respectivamente.

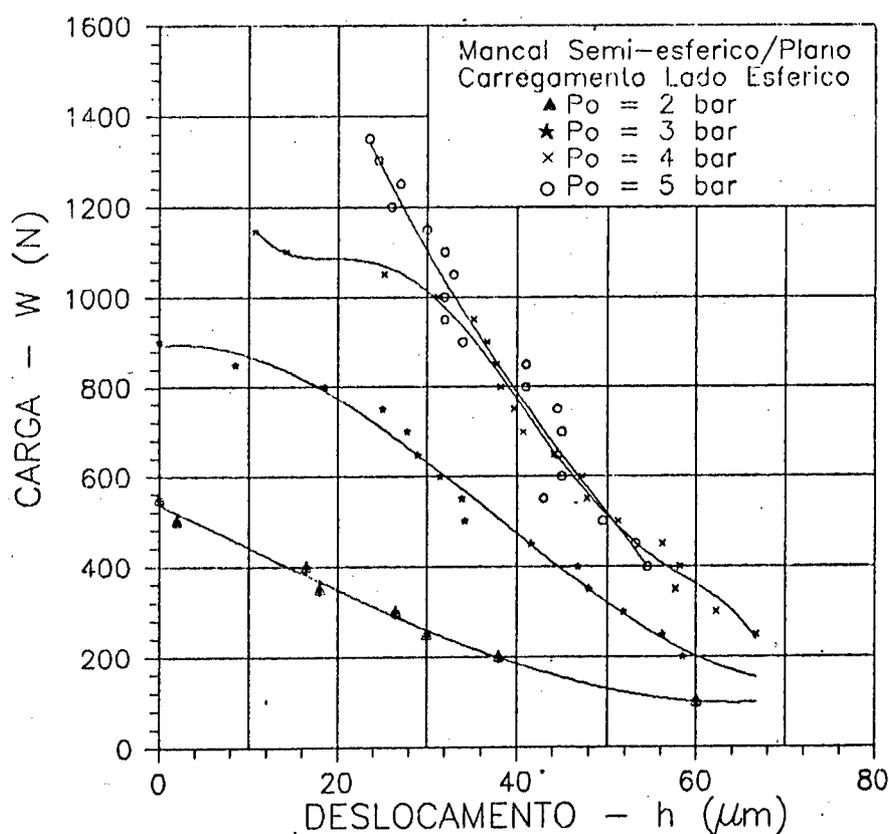


FIGURA 36 - Curvas deslocamento versus carga, para carga aplicada no lado esférico do mancal, com pressões de suprimento de 2, 3, 4 e 5 bar.

Estes gráficos foram construídos aplicando-se cargas através de massas calibradas, no dispositivo de aplicação de força, descrito anteriormente, e medidindo-se o deslocamento do rotor do mancal semi-esférico/plano, através do sistema de medição de deslocamento indutivo.

A principal dificuldade na realização destes ensaios é aplicar a carga no centro do mancal. Caso esta condição não seja satisfeita, haverá a ação de uma componente de força radial, fazendo com que o mancal se incline e, conseqüentemente, altere a folga no lado plano do mancal. A colocação das massas no dispositivo de forma centrada e a espera de alguns segundos, até a completa estabilização do movimento da haste de sustentação das massas, minimiza este problema.

A capacidade de carga estática do mancal semi-esférico/plano, para carregamento do lado esférico, está mostrado na figura 37.

Com o objetivo de comparar os valores obtidos experimentalmente com os valores obtidos através de cálculos teóricos, apresenta-se nesta figura os gráficos de capacidade de carga estática para um mancal semi-esférico, para diversas pressões de suprimento, calculadas segundo as metodologias propostas por Powell [9] e Slocum [10].

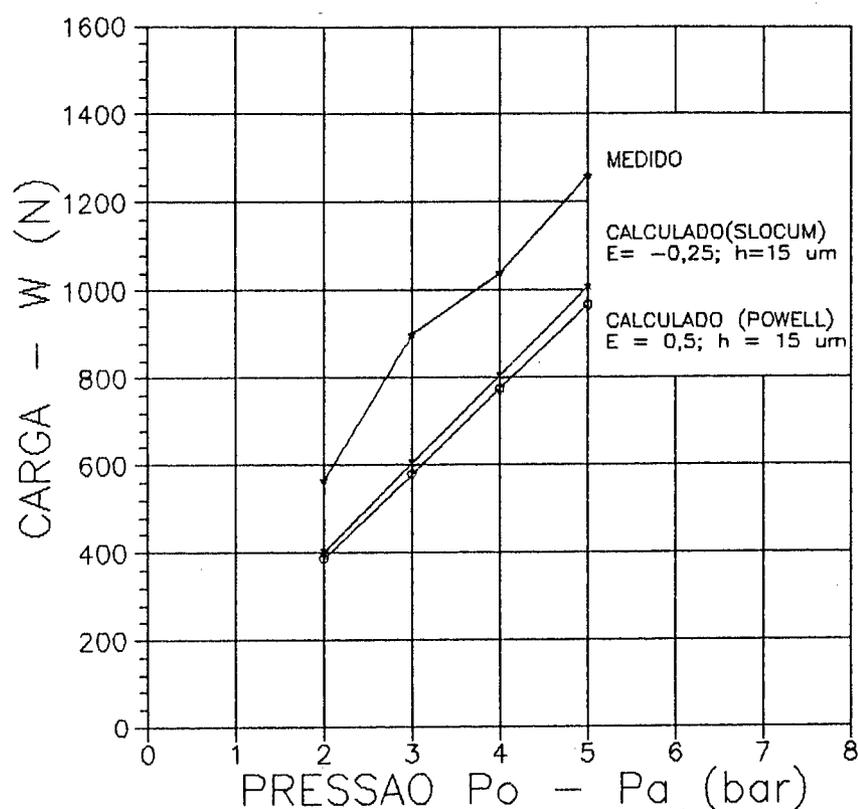


FIGURA 37 - Capacidade de carga do mancal semi-esférico/plano, para diversas pressões de suprimento, para carregamento no lado esférico.

Observa-se que, embora o comportamento das curvas sejam semelhantes, os valores obtidos experimentalmente apresentam valores aproximadamente 30 % superiores aos valores calculados teoricamente. Este melhor desempenho pode ser resultado do fato de que na metodologia de projeto proposta por Powell, foi adotado um coeficiente de excentricidade $\epsilon = 0,5$ e uma folga $h = 15 \mu\text{m}$, enquanto que Slocum adota $\epsilon = -0,25$ e $h = 15 \mu\text{m}$. Se acrescentarmos o fato de que nestes cálculos não estão considerados os erros inerentes ao processo de fabricação e ao sistema de medição, teremos que a influência dos erros de forma e

de acabamento superficial não são idealmente considerados nestes procedimentos, e justificam as diferenças obtidas.

As diferenças obtidas entre os resultados experimentais e os obtidos teoricamente podem ser considerados normais, mas enfatizam a necessidade de novos estudos teóricos e o aperfeiçoamento ou desenvolvimento de novas metodologias para o projeto de mancais aerostáticos semi-esféricos.

Na figura 38 são mostrados os gráficos de capacidade de carga estática do mancal semi-esférico/plano, para diversas pressões de suprimento, quando o carregamento foi efetuado no lado plano. São apresentados, também, os gráficos de capacidade de carga obtidos através de cálculos teóricos, segundo as metodologias de projeto de Powell [9] e Slocum [10].

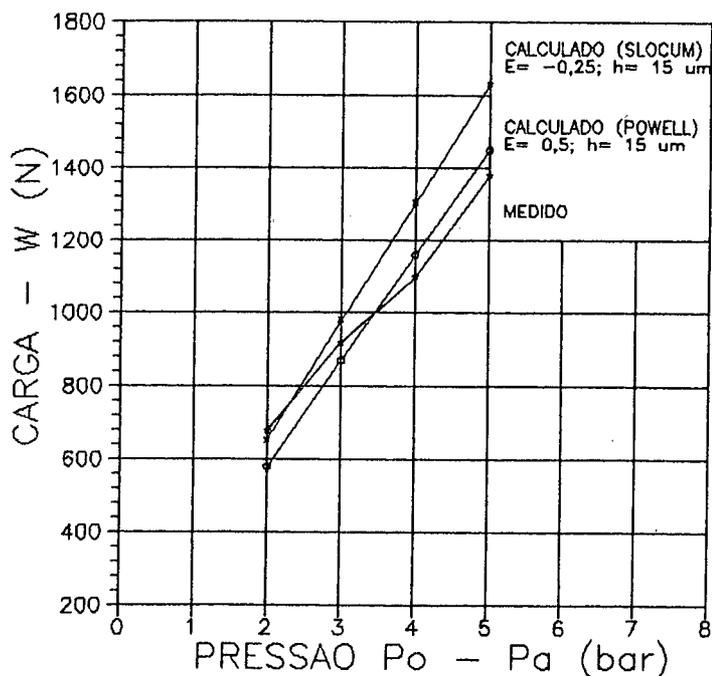


FIGURA 38 - Capacidade de carga do mancal semi-esférico/plano para diversas pressões de suprimento. Carregamento no lado plano.

Observa-se que o comportamento da curva experimental é semelhante ao das curvas obitidas teoricamente, para as pressões de suprimento de 2 e 3 bar, apresentando valores aproximadamente 20 % inferiores, para as pressões de 4 e 5 bar. Além das considerações feitas anteriormente, deve-se acrescentar o fato de que tínhamos limitação do número de massas calibradas, que não possibilitou a determinação da carga estática máxima suportada pelo mancal, para as pressões de suprimento de 4 e 5 bar, optando-se por considerar o valores de massa imediatamente inferiores àqueles que levaram a uma folga zero, estimando-se o valor de capacidade de carga máxima, para estas pressões.

A rigidez do mancal semi-esférico/plano para cargas aplicadas no lado esférico, para as diversas pressões de suprimento é mostrada nos gráficos da figura 39, juntamente com a rigidez calculada segundo as metodologias propostas por Powell [9] e Slocum [10].

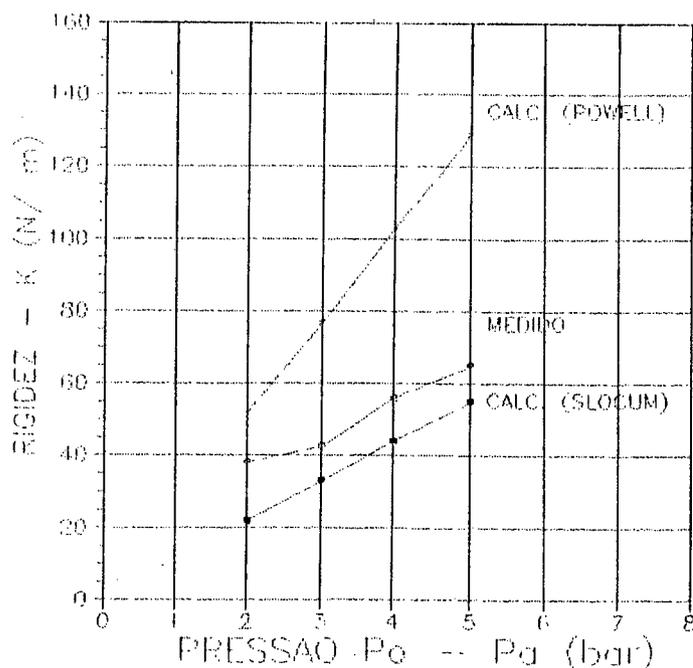


FIGURA 39 - Rigidez do mancal semi-esférico/plano para carregamento no lado esférico, com pressões de suprimento de 2, 3, 4 e 5 bar.

Observa-se que existe divergência entre os valores de rigidez obtidos segundo estas metodologias, mas que os valores obtidos experimentalmente situam-se entre valores intermediários, alcançando o valor de 65 N/μm, para uma pressão de suprimento de 5 bar.

Na figura 40 apresenta-se os gráficos de rigidez do mancal semi-esférico/plano quando são aplicadas cargas no lado plano, para pressões de suprimento de 2, 3, 4 e 5 bar, bem como os valores de rigidez calculados segundo as metodologias propostas por Powell [9] e Slocum [10].

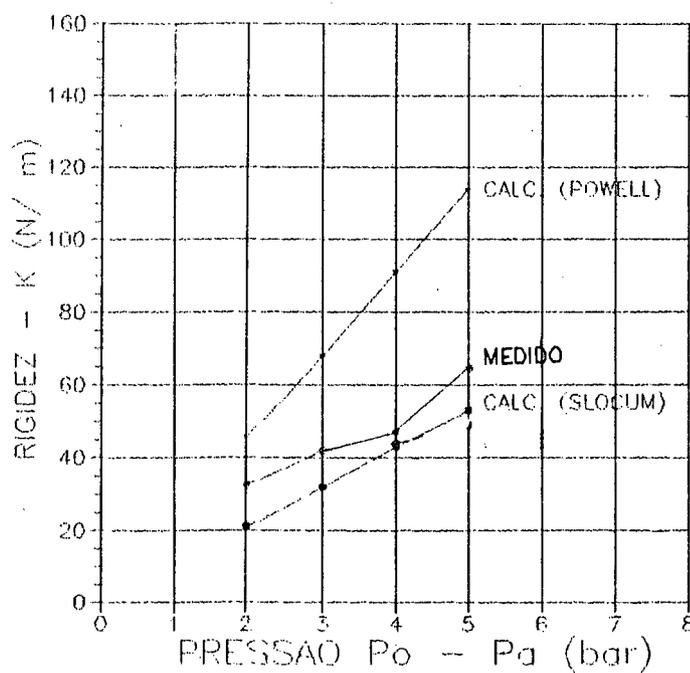


FIGURA 40 - Rigidez do mancal semi-esférico/plano para carregamento no lado plano, com pressões de suprimento de 2, 3, 4 e 5 bar.

5.2 Custos de Fabricação do Mancais Semi-esférico/Plano.

Os principais custos de fabricação de mancais aerostáticos estão relacionados às dificuldades de fabricação dos restritores de vazão e obtenção da folga entre o rotor e o estator, uma vez que eles devem ser fabricados com pequenas faixas de tolerâncias dimensionais, abaixo de IT 5, pequenos erros de forma e excelente qualidade superficial.

Naturalmente deve-se enfatizar que o custo do sistema de suprimento de ar para os mancais aerostáticos é um elemento significativo na utilização dos mesmos. Embora o sistema possa alimentar vários mancais, o custo do secador e dos filtros pode atingir valores da ordem de US\$ 650.

Não se dispõe, no Brasil, de dados sobre os custos para a fabricação de mancais aerostáticos com peças metálicas, integralmente fabricados por usinagem, uma vez que o processo de fabricação dos mancais aerostáticos é considerado segredo industrial, pelos fabricantes. Entretanto uma comparação entre os custos dos mancais comercializados no Brasil e os fabricados por moldagem, durante a realização desta tese, permite avaliar os benefícios dos mancais fabricados através do processo de moldagem, descrito anteriormente.

Utilizando-se o processo de moldagem na fabricação de mancais aerostáticos, obtem-se uma redução nos custos de fabricação. Esta redução de custos é consequência das menores exigências nas tolerâncias dimensionais, uma vez que apenas um dos componentes, neste caso, o rotor, precisa ser fabricado com tolerâncias de forma estreitas e bom acabamento superficial,

enquanto que o estator pode ser fabricado com tolerâncias de fabricação compatíveis com as obtidas em máquinas-ferramentas convencionais.

Embora as resinas especiais para guias de máquinas-ferramentas, utilizadas neste trabalho, apresentem um custo de aproximadamente cinquenta dolares por kilograma, a quantidade de resina para um mancal de 100 mm de diâmetro é da ordem de 50 g, e portanto, não afeta significativamente o custo final do mancal.

Além disto, a técnica possibilita a confecção dos restritores diretamente no corpo do mancal, durante o processo de moldagem, de forma que a dificuldade de fabricação dos restritores também é minimizada.

Os mancais aerostáticos para árvores de máquinas-ferramentas, disponíveis no mercado, com dimensões e características operacionais semelhantes às dos protótipos fabricados por moldagem têm custo aproximado de três mil dolares. Caso a árvore seja adquirida com mancal aerostático com motor de acionamento integrado, dependendo das dimensões, da precisão de giro e do tipo de motor utilizado, podem atingir valores da ordem de trinta mil a sessenta mil dolares [10].

Fazendo-se uma análise comparativa de custos, verifica-se que o custo interno de fabricação dos mancais aerostáticos moldados, não ultrapassou 30 % do custo de aquisição de mancais equivalentes importados, vendidos no Brasil. Com a otimização do processo e em caso de sua produção em escala industrial, será possível uma redução nos custos destes mancais, obtendo-se produtos com custos e qualidade competitivos no

mercado mundial.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

A fabricação de um mancal aerostático semi-esférico/plano e uma guia radial, empregando-se uma técnica de moldagem para obtenção do estator, utilizando o rotor como molde, foi desenvolvida no Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina. Esta técnica apresentou excelentes resultados para aplicações práticas, abrindo novos horizontes para futuros estudos, tanto no campo da fabricação de precisão como no de ultraprecisão.

Os problemas advindos da falta de infra-estrutura para fabricar os componentes com pequenas tolerâncias dimensionais, de forma e acabamento superficial, exigidos na fabricação de mancais aerostáticos, foram minimizados, adotando-se soluções de baixo custo.

A técnica de moldagem utilizada mostrou-se extremamente eficiente na fabricação de mancais aerostáticos, uma vez que possibilitou uma simplificação no processo de fabricação e proporcionou uma redução de custos.

Outra vantagem da técnica de moldagem diz respeito à possibilidade de se confeccionar os restritores diretamente na resina, dispensando a confecção dos restritores em bujões, ou no corpo do mancal, que na maioria dos casos é de difícil fabricação e alto custo.

A metodologia utilizada para a fabricação de mancais aerostáticos, aplicando a técnica de moldagem para a obtenção de

alguns componentes do mancal, simplifica bastante a fabricação dos mesmos, possibilitando sua fabricação em máquinas-ferramentas convencionais, com a precisão dimensional, de forma e de acabamento superficial, dentro das tolerâncias necessárias.

A fabricação do rotor semi-esférico por torneamento ou fresamento é relativamente simples, exigindo maior atenção na centragem entre o centro de rotação da peça e o eixo de giro da ferramenta, na direção x.

Embora a rigidez e a precisão de giro da árvore das fresadoras ou de tornos convencionais não sejam suficientes para garantir erros de forma e rugosidade R_a dentro das tolerâncias necessárias, uma operação complementar de lapidação garante as tolerâncias necessárias. A utilização de ferramentas simples e de baixo custo, possibilitou a obtenção da precisão de forma e acabamento superficial necessários, ou seja, erros de esfericidade menores que $1 \mu\text{m}$ e rugosidade R_a inferiores a $0,1 \mu\text{m}$.

O processo de moldagem permitiu "copiar" a forma esférica e o acabamento superficial do rotor semi-esférico para a calota semi-esférica, bem como a luva aerostática de uma guia linear, com relativa facilidade.

O mancal semi-esférico/plano apresentou capacidade de carga máxima de 1260 N, para carregamento do lado esférico, e rigidez de $65 \text{ N}/\mu\text{m}$, para pressão de suprimento de 5 bar. Estes valores estão próximos aos valores calculados pela teoria.

Os ensaios realizados e sua aplicação em trabalhos práticos, mostraram que é viável a utilização de mancais aerostáticos semi-esférico/plano em árvores de máquinas-

ferramentas de precisão e de ultraprecisão.

A aplicação da técnica de moldagem na fabricação da luva de mancais radiais mostrou-se vantajosa quando comparada ao processo de fabricação por brunimento. Com o processo de moldagem, foi possível obter-se uma precisão dimensional quatro vezes maior que a obtida com o processo de brunimento, além de facilitar a fabricação dos mancais com folga inferiores a 25 μm .

A técnica de moldagem de microfuros, aplicada na fabricação de mancais radiais, possibilita uma fácil fabricação dos restritores, com diâmetros abaixo de 0,2 mm.

Os resultados práticos obtidos abrem horizontes para sua utilização para fins industriais, contribuindo assim para o aperfeiçoamento técnico do País, principalmente para a indústria de máquinas-ferramentas e de metrologia. Esta tecnologia, também será útil para o estudo e pesquisa de novos tipos e formas de mancais, sendo uma importante ferramenta para a continuidade dos trabalhos em desenvolvimento no Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina.

CAPÍTULO 7

RECOMENDAÇÕES PARA NOVOS TRABALHOS

A partir da previsão das variáveis que influenciam os processos de fabricação dos componentes dos mancais desenvolvidos neste trabalho, foi possível solucionar a maioria dos problemas inerentes a cada processo, mas outros surgiram ao longo do trabalho, exigindo alterações e ajustes. Por exemplo, as ações planejadas para limpeza dos componentes após cada usinagem, e as dificuldades de montagem dos mesmos, exigiram cuidados extras, fortemente dependentes da habilidade do operador, principalmente na limpeza e manuseio dos componentes lapidados.

Os resultados promissores obtidos, exige a continuidade dos trabalhos, visando obter informações para o aperfeiçoamento e aplicações práticas, sugerindo-se os seguintes temas para estudo:

- Aplicação de resina líquida com cura, para a moldagem de mancais aerostáticos. Isto deverá facilitar a obtenção dos restritores moldados, mesmo aumentando os custos, devido a necessidade de dispositivos para injeção da resina.

- Aplicação do processo de moldagem, descrito neste trabalho, na fabricação de outras configurações de mancais, como duplo-esférico, mancais radiais, combinados, para obtenção de dados comparativos sobre o desempenho e as facilidades de fabricação e montagem dos componentes.

- Aplicação do processo de moldagem na fabricação de mancais com outras formas de restrição como orifícios rebaixados,

compensação com restrição na saída, rebaixos escalonados, etc, objetivando uma melhoria no desempenho de capacidade de carga e rigidez do mancal aerostático.

- Estudos para aperfeiçoamento da técnica de moldagem de microfuros, visando garantir perfeita localização dos mesmos, e redução nos diâmetros dos restritores.

- Análise dinâmica do comportamento do mancal semi-esférico/plano.

- Desenvolvimento de mancais aerostáticos diretamente acionados, permitindo sua utilização na árvore de uma máquina-ferramenta de ultraprecisão.

- Estudos para a redução dos custos de fabricação dos mancais aerostáticos, utilizando-se outros tipos de resinas, com custos inferiores ao da Diamant-Moglice, utilizada neste trabalho.

- Estudos para aperfeiçoamento da técnica de lapidação, utilizada na fabricação dos componentes de mancais aerostáticos.

- Estudos para o aprimoramento da bancada de ensaios para medição da capacidade de carga e rigidez do mancal semi-esférico/plano.

- Ampliar a utilização dos mancais, desenvolvidos durante este trabalho, em aplicações práticas, como por exemplo, o emprego do mancal semi-esférico/plano na retificação "plana" de componentes de um mancal aerostático com restrição na saída, apresentando uma conicidade de $8 \mu\text{m}$, em um raio de 60 mm.

- Ampliar o estudo teórico de mancais aerostáticos esféricos, com apoio do Laboratório de Ciências Térmicas da Universidade Federal de Santa Catarina e do Laboratório de

Máquinas-Ferramentas (LAMAFE) da USP-São Carlos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TSUWA, Hideo. Ultra-precision machining in Japan. *Bull. Japan Soc. Prec. of Engg.*, v. 16, n.1, p. 1-3, mar. 1982.
- [2] WEINGAERTNER, W. Usinagem de precisão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DE PRECISÃO, 1, 1988. São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABIMAQ, SINDIMAQ-SMP, 1988.
- [3] SCHNEIDER, Carlos Alberto. *Mecânica de precisão no Brasil: situação e diretrizes de desenvolvimento*. Florianópolis: CERTI, 1988. 46 p.
- [4] TANIGUSHI, N. Current status in, and future trends of ultra-precision machining and ultrafine materials processing. *Annals of the CIRP*, v. 32, n. 2, 1983.
- [5] BRYAN, J. B., CARTER, D. L. Precision contouring of brittle materials. In: ANNUAL REPORT ON PRECISION ENGINEERING, 2, 1985, *Anais...*, Jan. 1985.
- [6] SAKAI, Yasuo. Ultra-precision machine tool. *Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.*, v.18, n. 2, p. 146-152, June 1984.
- [7] WECK, M., BISPINK, T., BOTTGER, U. et al. *High precision spindle technology*. Aachen: IPT, 1991. 100 p.
- [8] PURQUERIO, B. M. *Projeto e fabricação de mancais de alta precisão lubrificados com filme de fluido*. 9 SCNB - 5 JIAI, São Paulo: SOBRACON, 1989.
- [9] POWELL, J. W. *Design of aerostatic bearings*. London: The Machinery Publishing, 1970. 280 p.
- [10] SLOCUM, Alexander h. *precision machine design*. Massachusetts: Prentice Hall Spring, 1991. Paginação irregular.
- [11] PURQUERIO, B. M. *Análise experimental de restritores flexíveis metálicos para mancais aerostáticos axiais*. São Carlos. USP, 1988. 140 p. Tese (Tese de Livre Docência) - Esc. de Eng. de São Carlos - USP, 1988.
- [12] WEINGAERTNER, W. L., ROCHA, A. S. Uma metodologia para fabricação de mancais aerostáticos esféricos em máquinas-ferramentas convencionais. In: CONGRESSO NACIONAL DE INGENIERIA MECANICA, 5, out. 1992, Ponta Arena. *Anais...* Ponta Arena: [s.n.], 1992. p. 749-755.
- [13] WILLIS, R. On the pressure produced on a flat plate when opposed to a stream of air issuing from an orifice in a plane surface. *Trans. Camb. phil. Soc.*, v. 3, p. 129-141, apr. 1828.
- [14] HIRN, M. G. Sur les principaux phénomènes que présentent les frottements médiats, et sur les diverses manières de

- determiner la valeur mécanique des machines. *Soc. Ind. Mulhouse Bull.*, 26.200, jun. 1854.
- [15] KINGSBURY, A. Experiments with an air lubricated journal. *I. Amer. Soc. Nav. Engrs.*, v.9, p. 267-292, 1897.
- [16] WESTINGHOUSE, G. Vertical fluid pressure turbine. U.S. Patent 745, 400, 1904.
- [17] ABBOTT, W. G. Device for utilizing fluid under pressure for lubricating relatively movable elements. U.S. Patent, 1, 185, 571, 1920.
- [18] REYNOLDS, O. On the theory of lubricating and its application to Mr. Beauchamp Towers experimentes, including an experimental determination of the viscosity of olive oil. *Phil. Trans.*, v. 177, p. 157-234, 1886.
- [19] HARRISON, W. J. The hidromechanical theory of lubrication with special reference to air as a lubricant. *Trans. Camb. phil. Soc.*, v. 2283, p. 39-54, may. 1913.
- [20] GROSS, W. A. *Gas film lubrication*. New York: John Wiley and Sons, 1962. 413 p.
- [21] COSNTANTINESCU, V. N. *Gas lubrication*. New York: A.S.M.E, 621p.
- [22] GRASSAN, N. S., POWELL, J. W. *Gas Lubricated Bearings*. London: Butterworths, 1964. 309 p.
- [23] Her Majesty's Stationary Office. Lubrications (Tribology) Education and Research: A report on the presente position and industry's Needs. London, Dept. of Education and Science, 1966.
- [24] SATOMI, Tadaatsu. Studies on the aerostatic guiding system-theory and experiments on the static rigidity and stability. *Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.*, n. 17, v.2, p. 107-112, jun. 1983.
- [25] ROBLEE, J. W. *Desing of externally pressurized gas bearings for stiffness and damping*. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1986. 34 p.
- [26] PURQUERIO, B. M. Banco de ensaios para mancais aerostáticos axiais: projeto, construção e testes experimentais. São Carlos: USP, 1975. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade de São Paulo, 1975.
- [27] PURQUÉRIO, B. M., BALESTERO, L. A. Mancais fluidicos aerostáticos com ranhuras de alimentação. *Máquinas e metais*, v. 26, n. 301, p. 48-58, abr. 1991.
- [28] THOMPSON, D. C. The design of an ultra-precision. *Annals of the CIRP*, v. 38, jan. 1989.

- [29] NAKAGAMA, T., SUZUKI, K, UEMATSU, T. et al. Development of a new turning center for grinding ceramic materials. *Annals of the CIRP*, v. 37, jan. 1988 .
- [30] MCKEOWN, P. A. The role of precision engineering in manufacturing of the future. *Annals of the CIRP*, v. 36, feb. 1987.
- [31] HORVATH, M. Design and construction of ultra-precision machine tools. PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL MACHINE TOOL ENGINEERS CONFERENCE, 2, Nov. 1986. *Anais...* P. 25-33. 1986.
- [32] MOREN, W. J. W., MODJARRAD, H., READ, R. F. J. Some aspects of the design and development of a large high precision CNC diamond turning machine. *Annals of the CIRP*, v. 31, n. 1, p. 409-414, jan. 1982.
- [33] FURUKAWA, Y., NORINUK, N., KITAGAWA, K. et al. Development of ultra precision machine tool made of ceramics. *Annals of the CIRP*, v. 35, jan. 1986.
- [34] NELSON, Jerry. Fabricating optics for the Keck Observatory. In: INTERNATIONAL PRECISION ENGINEERING-SEMINAR AND ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING, 5, 1989, Monterey. *Anais...* California, 1989, p. 18-22.
- [35] SUMIYA, Mitsuo, UEDA, K, TSUKADA, T. Machining of mirror-like surface-diamond cutting with newly developed high-precision air bearing spindle. *Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.*, v. 16, n. 1, mar. 1982.
- [36] DIAMOND Machining a primer: diamond machining of optics offers the systems designer substantial benefits. *Laser & Applications*, p. 63-70, mar. 1984.
- [37] NISHIGUCHI, T, MAEDA, Y, MASUDA, M., SAWA, M. Mechanism of micro chip formation in diamond turning of Al-Mg alloy. *Annals of the CIRP*, v. 37, n. 1, p. 117-120. 1988.
- [38] MOORE, W. R. Foundations of mechanical accuracy - 20 years later. INTERNATIONAL MACHINE TOOL ENGINEERS CONFERENCE, 2, *Anais...* p. 3-23. Nov. 1986.
- [39] PRATA, Alvaro, T. Desenvolvimento de um sistema de simulação de escoamento em mancais semi-esféricos, via volumes finitos, em desenvolvimento no Laboratório de Ciências Térmicas da Universidade Federal de Santa Catarina.
- [40] KOENIG, W., WECK, M, SPENRATH, N. et al. *Diamond machining technology*. Aachen: IPT, 1991. 96 p.
- [41] CARDIERI, L. V. C., VAROTTO, E. C. Projeto de um simulador dinâmico com mancal esférico aerostático para testes de sistemas de controle de atitude de satélites artificiais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECANICA, 9, 1987,

- Florianópolis. *Anais...* Florianópolis, 1987, p. 689-692.
- [42] PNEUMO PRECISION Inc. *MSG-325*: diamond tool lathe for micro machining of contours. Canada: Pneumo Precision, [19--]. 14 p.
- [43] SUMIYA, Mitsuo, UEDA, K, TSUKADA, Tameyasu. Machining of mirror-like surface. *Bull. Japan Soc. of Engg.*, v. 16, n. 1, p. 16-23, mar. 1982.
- [44] PROTOP-BLEILE GmbH, Optische Werkstätten Luftlagertechnik und Feinstbearbeitungsmaschinenfabrik. [19--]. 4 p.
- [45] MIZUMOTO, H., KUBO, M., MAKIMOTO, Y., YOSHIMUCHI, Y. et al. A hydrostatically-controlled restrictor for an infinite stiffness hydrostatic journal bearing. *Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.*, v. 21, n. 1, p. 49-55, mar. 1986.
- [46] HORIKAWA, O., OSADA, H., SHIMOKOHBE, A. Vibration, position and stiffness control of an active air journal bearing. In: INTERNATIONAL PRECISION ENGINEERING - SEMINAR AND ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING, 5, 1989, Monterey. *Anais...* Monterey, 1989, p. 18-22.
- [47] KANAI, Minori. Manufacturing technology. *Bull Japan Soc. of Prec. Engg.* v. 18, n.2, p. 85-89. Jun. 1984.
- [48] VALLEJOS, R. V. *Processos e modos de fabricação de superfícies esféricas de precisão*. UFSC, Florianópolis, 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.
- [49] DIAMANT MOGLICE. *Revestimento deslizante para máquinas operatrizes*. São Paulo: Diamant Plasticmetal, [19--].
- [50] WMW - RUHLA. Universal-werkzeugfräsmaschine FUW 250/IV. Berlin: WMW - Ruhla, [19--]. paginação irregular.
- [51] TORNO HORIZONTAL I-20. Santa Bárbara D'Oeste: ROMI, [19--]. paginação irregular.
- [52] STOETERAU, R. L. *Comportamento estático e dinâmico de luvas aerostáticas para guias lineares*. UFSC, Florianópolis, UFSC, 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.
- [53] WEINGAERTNER, Walter L., ROCHA, Antonio S., STOETERAU, Rodrigo. Statisches und dynamisches Verhalten von zylindrischen luftgelagerten Zuhungen. In: INTERNATIONALES KOLLOQUIUM FEINWERKTECHNIK, 14, 1992, Wien. *Anais...* Wien: VDI, 1992, p. 108-116.
- [54] WEINGAERTNER, Walter L. Fertigungsverfahren zur Herstellung von Luftlagern. In: INTERNATIONALES KOLLOQUIUM FEINWERKTECHNIK, 14, 1992, Wien. *Anais...* Wien: VDI, 1992,

p. 118-126.

- [55] WEINGAERTNER, W. L., STOETERAU, R. L. Comportamento estático e dinâmico de guias aerostáticas cilíndricas. In: CONGRESSO NACIONAL DE INGENIERIA MECANICA, 5, out. 1992, Punta Arena. *Anais...* Punta Arena: [s.n.], p. 768-779. 1992.
- [56] WEINGAERTNER, W. L., VALLEJOS, R. V. Fabricação de superfícies esféricas de precisão. In: CONGRESSO NACIONAL DE INGENIERIA MECANICA, 5, out. 1992, Punta Arena. *Anais...* Punta Arena: [s.n.], p. 791-801. 1992.

8.1 OUTRAS OBRAS CONSULTADAS:

- [57] PATTERSON, S. R. Development of the large optics diamond turning machine. *energy and technology review* . Lawrence Livermore National Laboratory. p. 23-28. Sept. 1987.
- [58] ERICKSON, N. R. Off-axis mirrors made using a conventional milling machine. *Applied Optics*, v. 18, n. 7, p. 956-957, apr. 1979.
- [59] HASHIMOTO, Hiroshi. Ultra-precision machine and drive system. *Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.*, v. 16, n.1 mar. 1982.
- [60] NAKAGAWA, T., SUZUKI, K., UEMATSU, T., et al Development of a new turning center for grinding ceramic materials. *Annals of the CIRP*, v. 37, jan. 1988.
- [61] MCKEOWN, P. High precision manufacturing in an advanced industrial economy. Cranfield Unit for Precision Engineering.
- [62] DI GIACOMO, B. Aspectos metrológicos em engenharia de precisão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECANICA DE PRECISÃO, 1, 1988, *Anais...* São Paulo, ABIMAQ, SINDIMAQ-SMP. 1988.
- [63] WU, S. M., NI, J., ARBOR, A. Precision machining without precise machinery. *Annals of the CIRP*, v. 38, jan. 1989.
- [64] DOEGE, E., SILBERBACH, G. Influence of various machine tool components on workpiece quality. *Annals of the CIRP.*, v. 39, n. 1, p. 209-213. 1990.
- [65] IKAVA, N., DONALDSON, R. R., KOMANDURY, R. et al. Ultraprecision metal cutting - the past, the present and the future. *Annals of de CIRP*. v. 40, n. 2, p. 587-594. 1991.
- [66] WECK, M., BISPINK, T., PYRA, M. *Analyzing the dynamic performance of high precision machines*. Aachen: IPT, 1991. 74 p.
- [67] SIMON, Alexandre T. Fusos de alta velocidade que usam mancais magnéticos. *Máquinas e Metais*, p. 26-28, abr. 1991.

- [68] ARNESON, H. Reminiscences of the development of a precision machine shop in the upper mid-west of the United States. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECANICA DE PRECISÃO, 1, 1988, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABIMAQ, SINDIMAQ-SMP, 1988.
- [69] KYUSOJIN, Akira, INADA, Hisashi. Lapping high precision polygonal shafts. *Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.*, v. 18, n. 1, p. 21-26, mar. 1984.
- [70] NAMBA, Y, TSUWA, H, WADA, R. Ultra-precision float polishing machine. *Annals of the CIRP*, v. 36, p. 211-213, 1987.
- [71] ROBERT, P. Traditional optical fabrication methods. In: *APPLIED optics and optical engineering*. [S.l.]: Academic Press. Inc., v. 10, p. 225-249. 1987.
- [72] PURQUERIO, B. M. *Manuais aerostáticos - ábacos*. São Carlos: Laboratório de Maquinas Ferramentas-EESC-USP. 1987. [n. p.]

ANEXO 1

EQUAÇÕES BÁSICAS PARA MANCAIS AEROSTÁTICOS

As equações que regem o escoamento de um fluido (compressível ou incompressível) em mancais [9,10,22,26] são:

I - Equação da continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

II - Equação da quantidade de movimento (equação de Navier- Stokes)

a) na direção " x "

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho B_x \quad (2)$$

b) na direção " y "

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho B_y \quad (3)$$

c) na direção " z "

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \rho B_z \quad (4)$$

Onde B_x , B_y e B_z são as componentes das forças de corpo nas direções x, y e z, respectivamente.

Para a dedução da equação para mancais (equação de Reynolds), foi tomado como referência o sistema cartesiano

mostrado na figura 41 , onde se pode ver duas superfícies quaisquer, uma em movimento e a outra parada, sendo que entre elas existe um filme fluido de espessura $h(x,y)$.

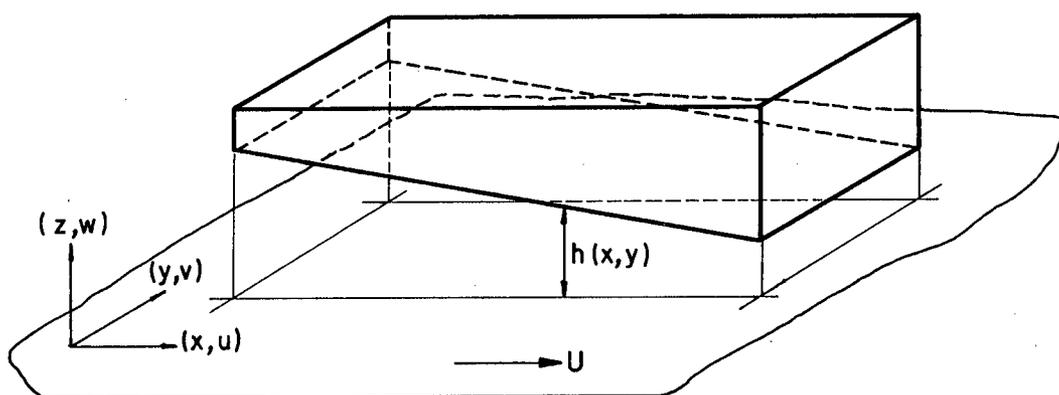


FIGURA 41 - Sistema de referência utilizado na dedução da equação de Reynolds (película de lubrificante).

Onde:

- x - direção principal do movimento
- y - direção secundária do movimento
- z - direção da espessura do filme
- u - velocidade na direção x
- v - velocidade na direção y
- w - velocidade na direção z

$h(x,y)$ - espessura do filme lubrificante

U - velocidade do mancal

Na dedução da equação de Reynolds, são feitas algumas hipóteses simplificativas:

I - O lubrificante é um fluido Newtoniano;

II - O escoamento do fluido é laminar;

III - regime permanente

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial t} = 0$$

IV - Regime plenamente desenvolvido (não existência de deslizamento na camada limite);

V - Não atuam forças externas no fluido

$$B_x = B_y = B_z = 0$$

VI - As forças de inércia são desprezadas em comparação com as forças de cisalhamento. Estas forças de inércia consistem das acelerações do fluido e forças centrífugas.

O lado esquerdo das equações (2), (3) e (4) igual a zero;

VII - Pressão constante através da espessura do filme do fluido (direção z)

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0$$

VIII - Condição de não deslizamento nas superfícies sólidas

$$z = 0 \rightarrow u = U$$

$$z = h \rightarrow u = 0$$

IX - A espessura da película lubrificante (direção z) é muito pequena em relação às outras dimensões. Isto faz com que as derivadas da velocidade através da espessura da película sejam consideradas de maior importância quando comparadas com as derivadas das velocidades nas outras direções (hipótese de filme fino), podendo ser desprezadas nas equações (2), (3) e (4).

$$\frac{\partial u}{\partial z} \gg \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}$$

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

X - A viscosidade é constante. Esta hipótese é mais grosseira para fluidos incompressíveis pois normalmente a viscosidade desses fluidos varia muito com a temperatura.

De acordo com as hipóteses anteriores as equações se reduzem a:

- Equação da continuidade

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

- Navier-Stokes na direção x

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (6)$$

- Navier-Stokes na direção y

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (7)$$

Integrando as equações de Navier-Stokes (6) e (7) ao longo do filme lubrificante, obtemos os perfis de velocidade (u e v), que substituídos na equação da continuidade (5) e após uma nova integração ao longo da espessura do filme lubrificante (de 0 a h), resulta na conhecida equação de Reynolds para mancais:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\mu \frac{\partial}{\partial x} (\rho U h) \quad (8)$$

A equação (8) fornece o campo de pressão para fluidos compressíveis ou incompressíveis.

Para fluidos incompressíveis a densidade é constante desaparecendo da equação (8), cuja resolução fornece diretamente o campo de pressão.

Para o caso de fluidos compressíveis, como ocorre com os mancais aerostáticos, existe a necessidade de uma equação que nos mostre como ocorre a variação da densidade.

Obtém-se uma boa aproximação exprimindo a densidade em função da pressão e temperatura, podendo-se usar a equação dos gases perfeitos.

$$p = R\rho T \quad (9)$$

Considerando que a dissipação é pequena (T pode ser assumida constante), a substituição de (9) em (8) resulta na equação (10) que é a equação de Reynolds, válida para mancais aerostáticos (considerando o ar como gás perfeito).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 p \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 p \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\mu \frac{\partial}{\partial x} (p U h) \quad (10)$$

Conhecido o campo de pressão, pode-se calcular a carga que o mancal pode suportar e também os campos de velocidade através das equações (6) e (7).

Com os campos de velocidade podem-se calcular os fluxos de massa nas direções x e y.

Para mancais aerostáticos em baixas velocidades, obtém-se boa aproximação assumindo a pequena variação de densidade comparadas com os outros termos da equação, usando-se a equação de Reynolds para fluidos incompressíveis.

ANEXO 2

METODOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DO MANCAL SEMI-ESFÉRICO

No dimensionamento do mancal aerostático semi-esférico, foi adotado o mesmo procedimento utilizado por Cardieri [41], que consiste num método de equivalência entre mancais aerostáticos axiais e esféricos, extensíveis às hipóteses admitidas para o escoamento, sendo portanto as equações para mancais esféricos as mesmas utilizadas para mancais axiais, modificadas apenas devido à geometria.

O cálculo de um mancal esférico, alimentado por um anel de orifícios, como mostrado na figura 42, utiliza as mesmas hipóteses efetuadas para mancais axiais, consistindo na integração da equação de Navier-Stokes para obter a expressão da vazão em função da queda de pressão.

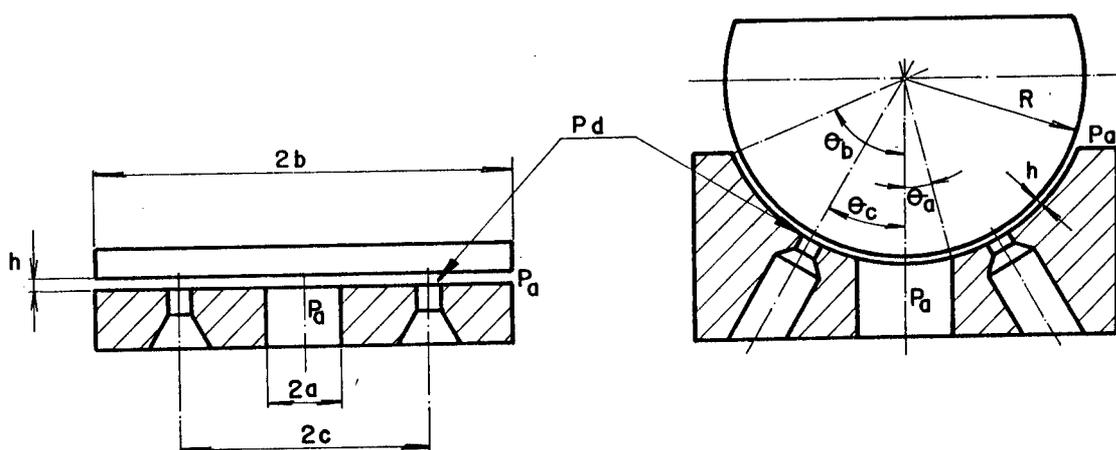


FIGURA 42 - Esquema de mancais axial e esférico, equivalentes, segundo Cardieri [41].

As relações entre as principais dimensões dos mancais axial e esférico, para que seja garantida uma equivalência no dimensionamento, segundo Cardieri [41], são:

- Área do mancal axial

$$A_a = \pi \cdot b^2 \cdot (1 - (a/b)^2) \quad (11)$$

- Área do mancal esférico

$$A_e = 2 \cdot \pi \cdot R^2 (\cos \theta_a - \cos \theta_b) \quad (12)$$

Confrontando as expressões obtidas para a pressão no mancal esférico, com a obtida para mancal axial [7,9], observa-se que a relação entre os diâmetros do mancal axial, mostrados na figura 44,

$$M = b / a \quad (13)$$

é equivalente no mancal esférico, à relação entre o seno dos ângulos formados pela borda externa e centro do mancal e o formado pela borda interna e o centro do mancal, ou seja,

$$M = \sin \theta_b / \sin \theta_a \quad (14)$$

Para que as áreas de ambos os mancais sejam iguais, tem-se:

$$b = [2R^2 (\cos \theta_a - \cos \theta_b) / (1 - 1/M^2)]^{1/2} \quad (15)$$

As demais dimensões, tais como a folga, o diâmetro de orifício, profundidade do rebaixo, etc, são consideradas idênticas, entre os dois mancais.

ANEXO 3

PROJETO DE MANCAIS AEROSTÁTICOS RADIAIS

Apresenta-se aqui, um resumo do procedimento para o projeto de mancais aerostáticos, proposto por Powell [9], que fornece as equações para o dimensionamento do mancal, ou alternativamente, gráficos que facilitam o projeto dos mancais aerostáticos. Estes gráficos foram adaptados por Purquério [72], com as unidades do sistema ISO.

A seguir apresenta-se os gráficos principais para o projeto de mancais radiais, anexo 3, e para mancais axiais, anexo 4, apenas para a restrição por orifícios sem rebaixo, utilizada neste trabalho.

A capacidade de carga de um mancal aerostático radial é expresso em termos do coeficiente de carga adimensional C_1 :

$$C_1 = [W / (P_o - P_a) \cdot LD] \quad (16)$$

O coeficiente de carga C_1 , para um dado coeficiente de excentricidade ϵ , depende da razão de pressão K_{go} , onde, para o eixo na posição concêntrica:

$$K_{go} = [(P_d - P_a) / (P_o - P_a)] \quad (17)$$

Os valores ótimos da razão de pressão K_{go} variam com o coeficiente de excentricidade ϵ , conforme os valores abaixo:

consideradas as pressões de suprimento disponíveis, o comprimento e o diâmetro do mancal.

Esta etapa pode ser efetuada, consultando-se a figura 44. Esta figura dá uma estimativa da capacidade de carga e vazão volumétrica para mancais radiais até 200 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento, com uma pressão de suprimento $P_o - P_a = 6,9 \times 10^5$ N/m².

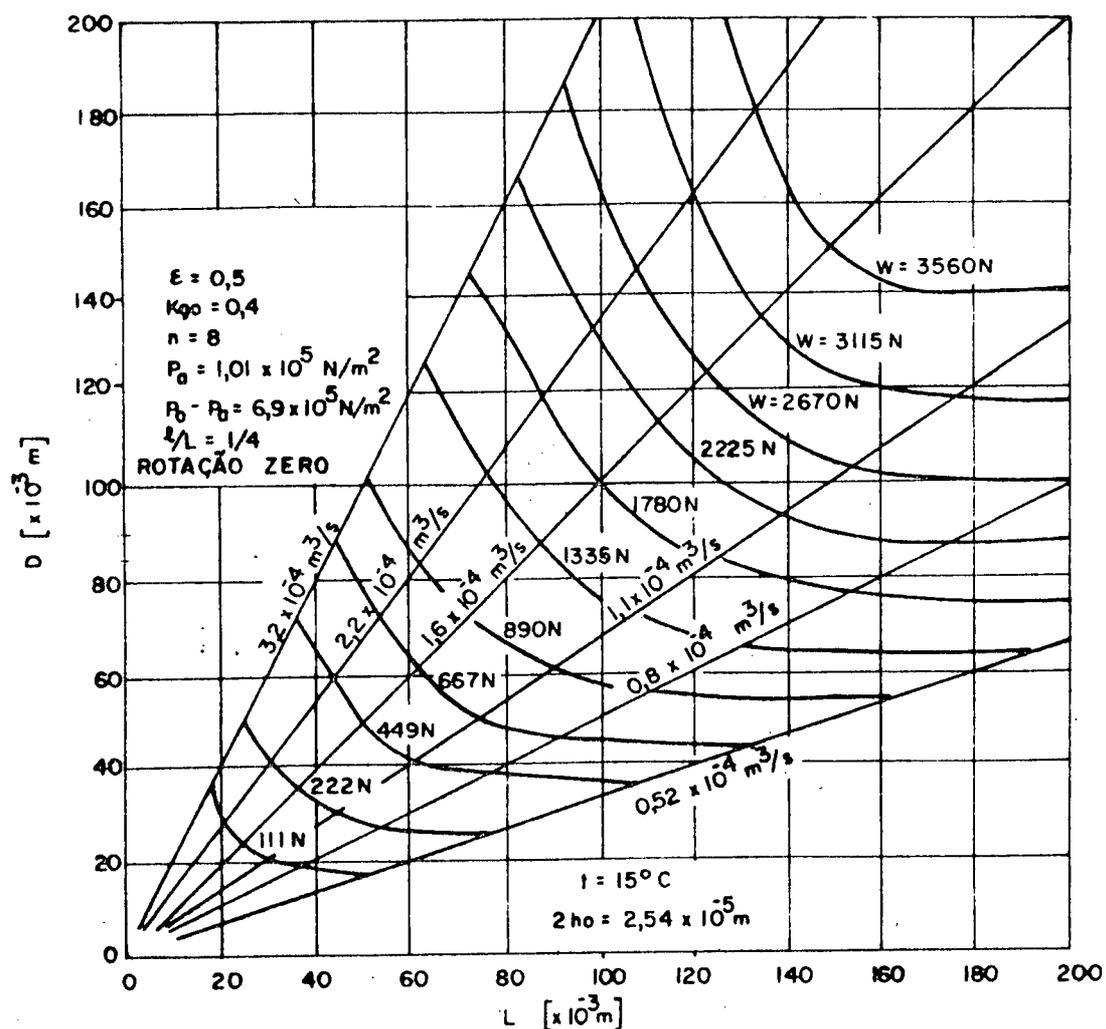


FIGURA 44 - Estimativa da capacidade de carga e vazão para mancais radiais com duas carreiras de orifícios com rebaixo [72].

Os dados são válidos para mancais com duas carreiras de alimentação, com oito orifícios com rebaixo, para um coeficiente de excentricidade de 0,5.

Para orifícios sem rebaixo, os valores dos gráficos devem ser recalculados:

Para outras pressões de alimentação, deve-se multiplicar a carga por:

$$[0,66 (P_o - P_a) / (6,9 \times 10^5)] \quad (22)$$

A rigidez é 2/3 da rigidez para orifício com rebaixo.

Para $P_o - P_a = 5,17 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, multiplicar a vazão por 0,642.

Para $P_o - P_a = 3,45 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, multiplicar a vazão por 0,356.

Para $P_o - P_a = 1,73 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, multiplicar a vazão por 0,142.

Para outras folgas diametrais, multiplicar a vazão por

$$(2 h_o / 2,54 \times 10^{-5})^3 \quad (23)$$

A capacidade de carga obtida por este gráfico é válida para um gás em uma determinada temperatura, que neste caso é o ar a 15 °C. Para outras temperaturas deve-se aplicar fatores de correção [9].

O próximo passo no projeto de um mancal aerostático radial é a determinação do diâmetro do restritor em função da folga média do mancal.

Isto pode ser efetuado através da figura 45, aplicando-se fatores de correção para outras pressões de alimentação, número de restritores por carreira, relação comprimento/diâmetro e posição das carreiras de restritores.

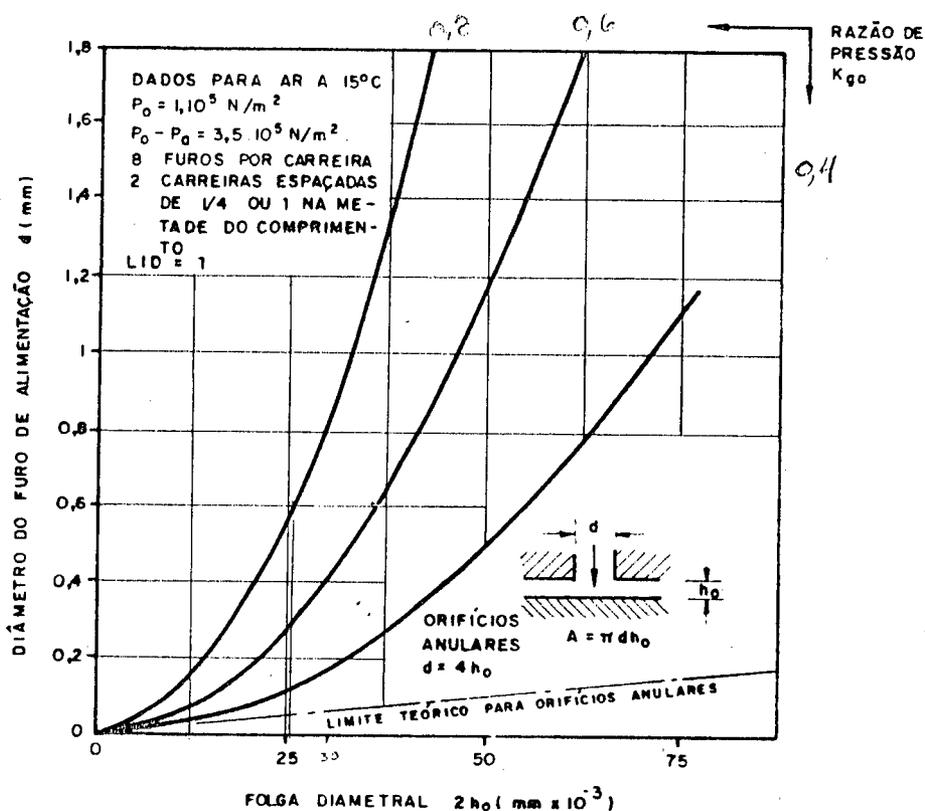


FIGURA 45 - Determinação do diâmetro do orifício sem rebaixo em função da folga diametral, para mancais aerostáticos radiais [72].

Estes fatores de correção são dados na figura 46.

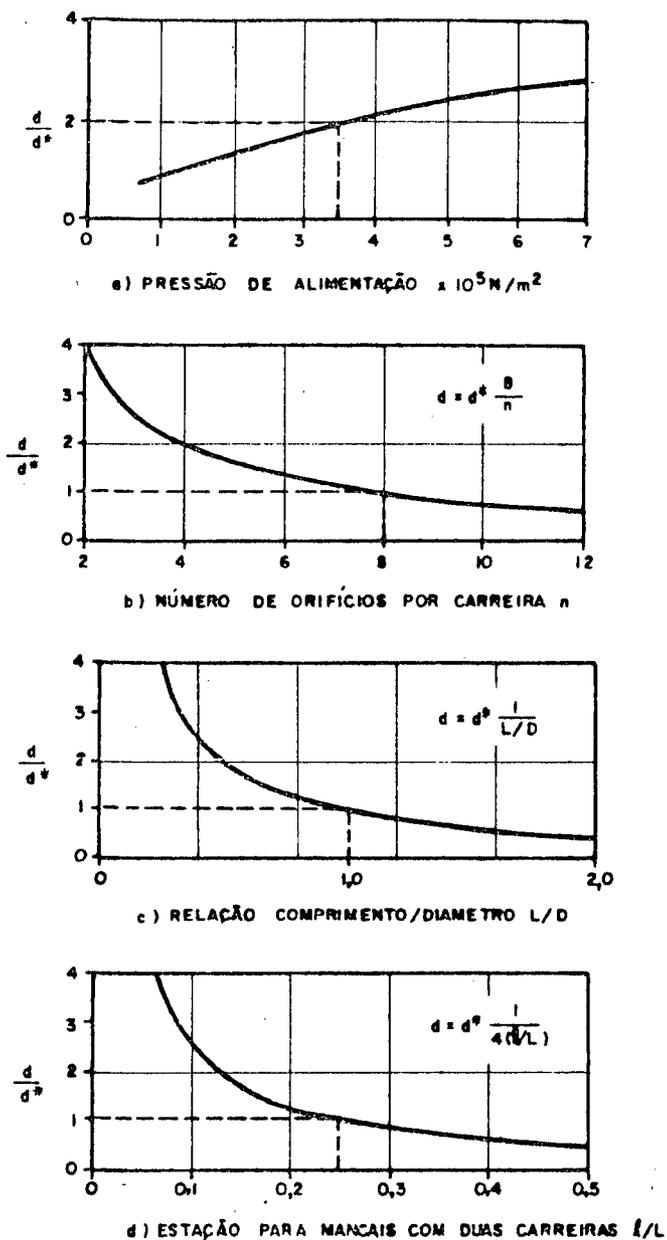


FIGURA 46 - Variação do diâmetro do orifício sem rebaixo em função de vários parâmetros dos mancais radiais [72].

Este procedimento permite chegar a valores aproximados para o tamanho e forma do mancal, sua folga, capacidade de carga, rigidez, atrito e consumo de gás. Em seguida, é possível proceder um estudo de projetos alternativos, selecionando-se outros tipos de restritores de ranhura e investigando-se o efeito das variações de suas dimensões e posições, na performance dos mancais.

ANEXO 4

PROJETO DE MANCAIS AEROSTATICOS AXIAIS

A base para o projeto de mancais axiais é a mesma descrita para mancais radiais. Consiste na busca de um compromisso entre as exigências de demanda e performance, a disponibilidade de suprimento de gás e a capacidade de fabricação.

A capacidade de carga e vazão de gás podem ser estimadas pelos gráficos da figuras 47.

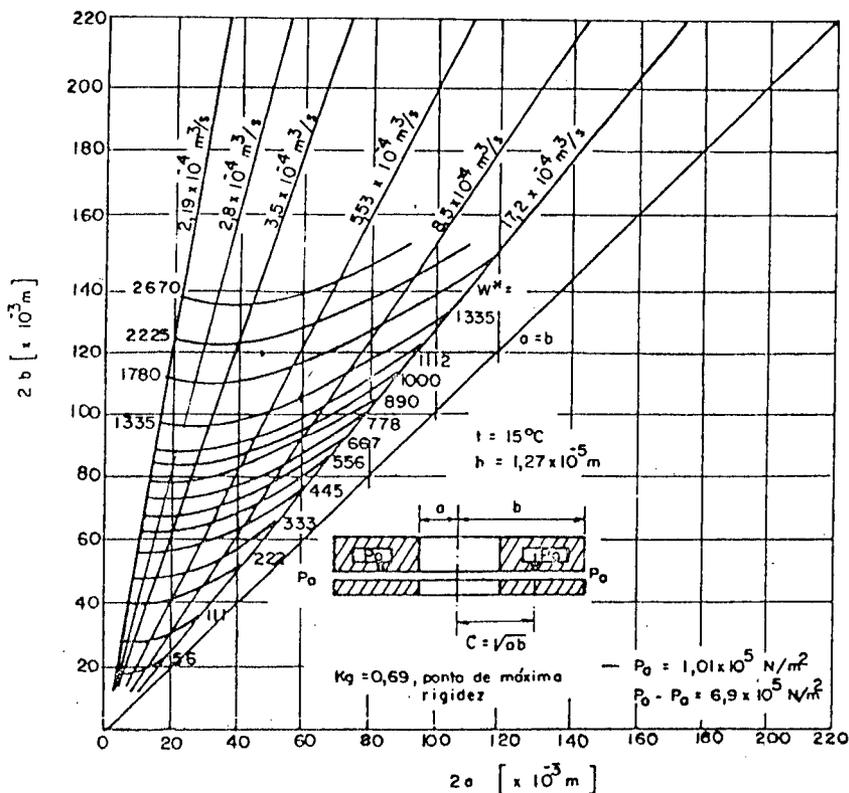


FIGURA 47 - Estimativa da capacidade de carga e da vazão para mancais aerostáticos axiais com um anel de orifícios de alimentação [72].

Estes dados são válidos para a pressão de suprimento de $P_o - P_a = 6,9 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. e a exaustão para a atmosfera. Para outras pressões de alimentação a carga deve ser multiplicada por:

$$[(P_o - P_a) / 6,9 \times 10^5] \quad (24)$$

A folga de referência é de $12,7 \mu\text{m}$ e para outras folgas, deve-se multiplicar a vazão por:

Para $P_o - P_a = 5,17$, multiplicar a vazão por 0,625.

Para $P_o - P_a = 4,13$, multiplicar a vazão por 0,425.

Para $P_o - P_a = 3,44$, multiplicar a vazão por 0,325.

Para $P_o - P_a = 1,73$, multiplicar a vazão por 0,170.

Para outras folgas, multiplicar a vazão por:

$$[(2.h^* / 2,54 \times 10^{-5})]^3 \quad (25)$$

Estes gráficos fornecem a capacidade de carga em um ponto de máxima rigidez ($K_g = 0,69$), sendo a capacidade de carga máxima 45 % superiores.

Os coeficientes de carga para mancais axiais com alimentação central e anular, são comparados nos gráficos da figura 48.

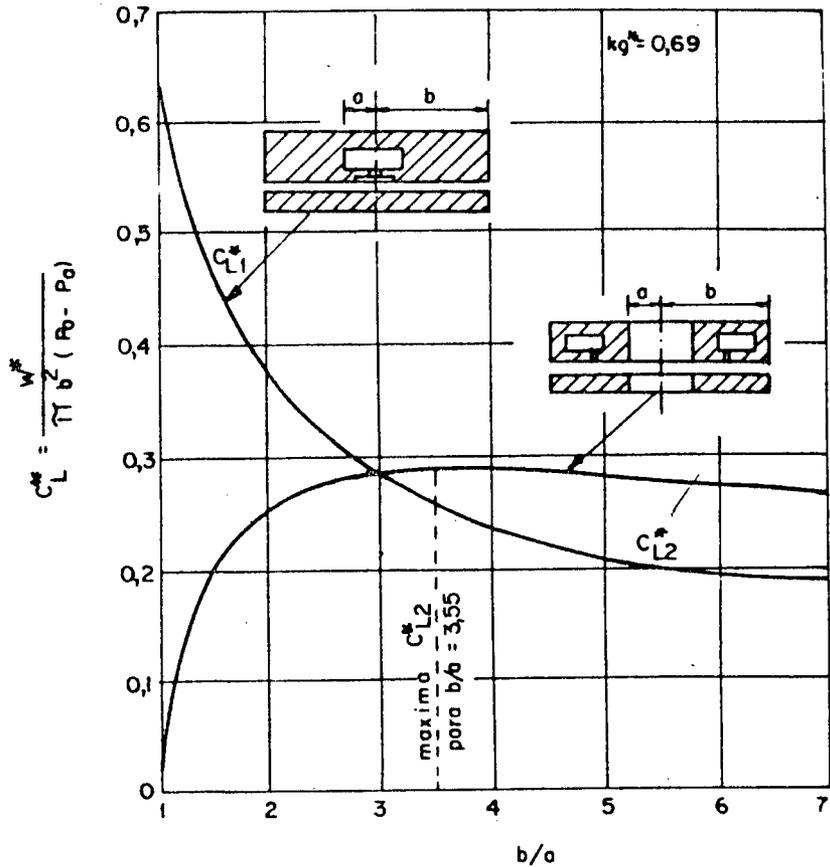


FIGURA 48 - Coeficiente de carga ótimo para mancais axiais, conforme Shires [72].

Uma vez que o tamanho e a forma do mancal é estabelecido considerando-se a capacidade de carga, rigidez e vazão do gás é possível proceder-se para obter o diâmetro do orifício requerido. Isto pode ser feito pelos gráficos da figura 49. Nesta figura o diâmetro ótimo do orifício para um mancal axial com orifício central rebaixado é plotado em função da

folga, para várias relações raio externo/raio do rebaixo (b/a). Os dados são válidos para o ar a 15°C , pressão de suprimento de $3,45 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, exaurindo-se para a atmosfera.

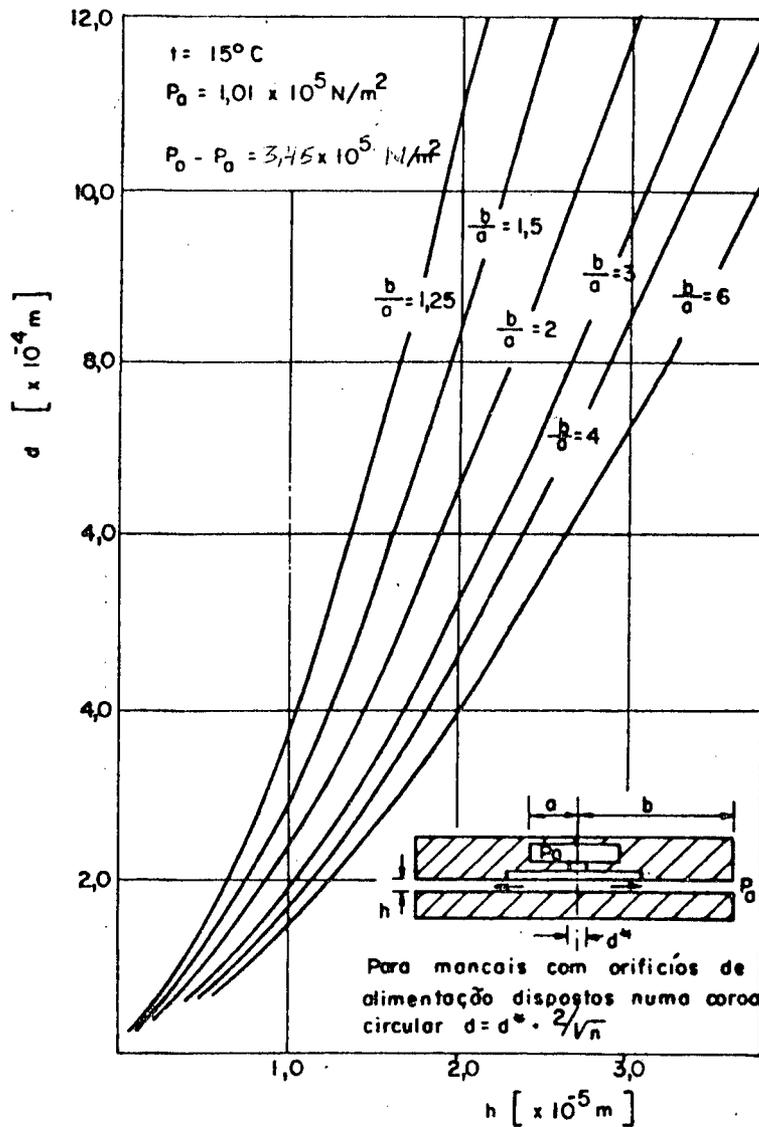


Figura 49 - Determinação do diâmetro do orifício com rebaixo em função da folga dos mancais aerostáticos axiais [72].

Para orifício com rebaixo dispostos numa coroa circular estes valores devem ser corrigidos por: $d = d^* \cdot 2 / \sqrt{n}$

Para orifícios sem rebaixo, dispostos numa coroa circular, deve-se aplicar os fatores de correção da figura 50-a, para outras pressões de suprimento e os fatores de correção da figura 50-b para mancais anulares com número de orifício variando de 4 a 24, possuindo a mesma relação b/a .

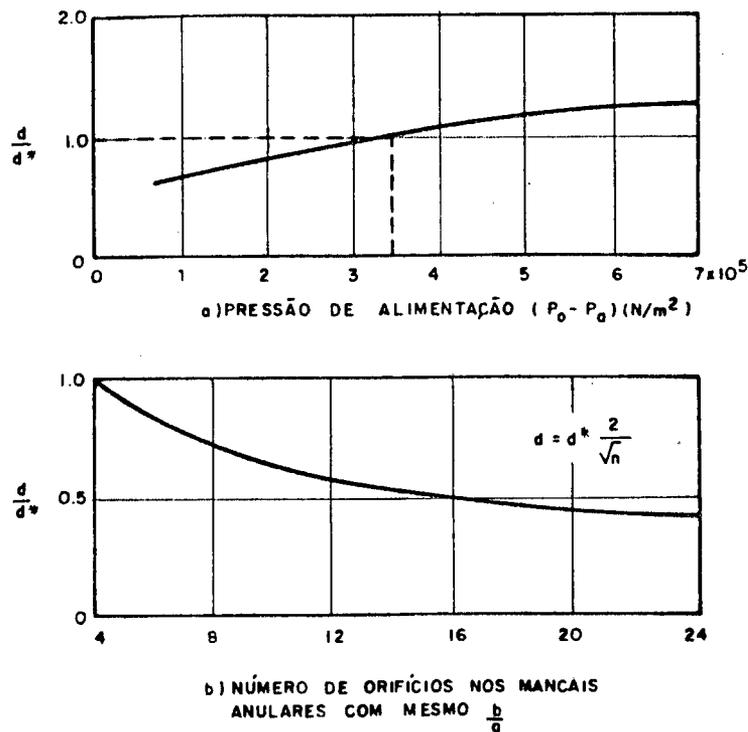


Figura 50 - Variação do diâmetro ótimo do orifício com a pressão de alimentação e com o número de orifícios para mancais axiais anulares.

As influências da pressão, temperatura e propriedades do gás na otimização do diâmetro do orifício são semelhantes tanto para mancais axiais quanto para mancais radiais.

ANEXO 5

MAQUINAS-FERRAMENTAS DE PRECISÃO PARA
FABRICAÇÃO DE SUPERFÍCIES ESFÉRICAS

a) Máquina com deslocamento "T"

Sua base tem um formato de um T, possuindo dois eixos de deslocamentos, de modo que o eixo-árvore e a ferramenta movem-se em direções perpendiculares entre si, como mostrado na representação esquemática da figura 51.

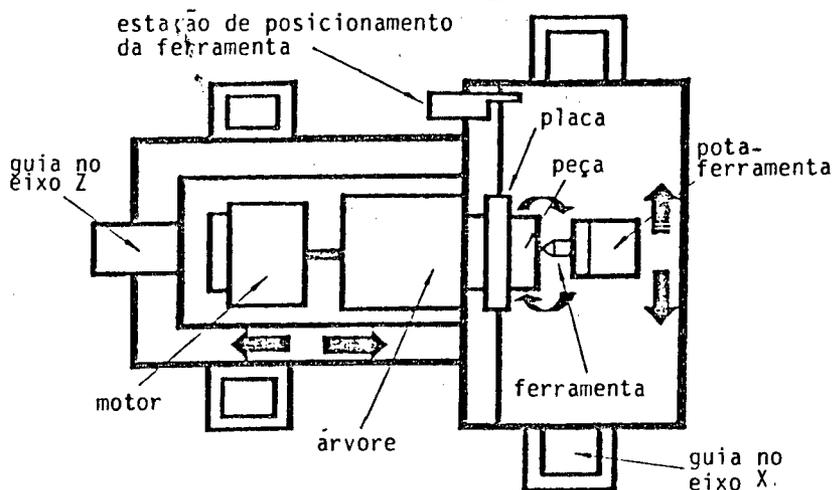


FIGURA 51 - Representação esquemática de uma máquina com deslocamento "T".

Nestas máquinas é possível gerar superfícies planas, esféricas, toroidais, parabólicas, hiperbólicas, elípticas ou quaisquer superfícies de simetria rotacional.

b) Máquina de contorno com deslocamentos perpendiculares da ferramenta ("stacked slideway")

Sua configuração é semelhante à máquina com deslocamento T, possuindo dois eixos e produzem superfícies de simetria rotacional, com a diferença que os dois movimentos, longitudinal e transversal, são realizados pela ferramenta, ficando o eixo-árvore fixo, conforme está esquematicamente representado na figura 52.

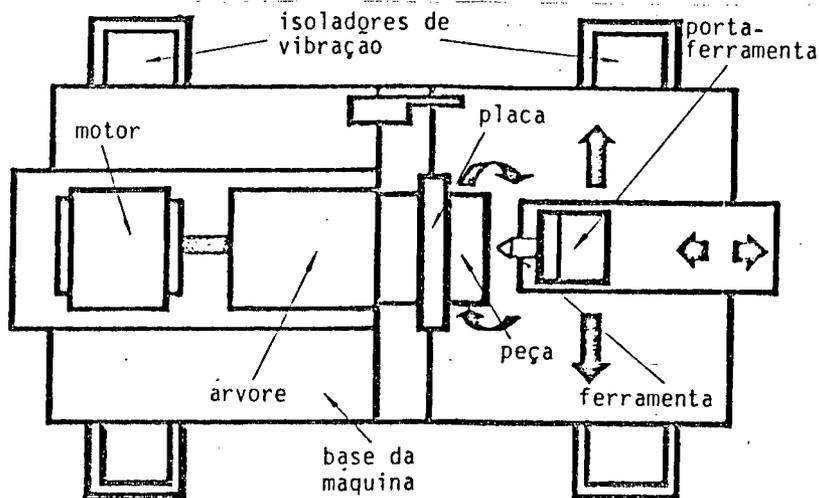


FIGURA 52 - Representação esquemática de uma máquina de contorno com deslocamento simultâneo.

c) Máquina de contorno polar "R - θ "

Esta é uma máquina de contorno, cujos movimentos são ao longo das direções "R" e " θ " de um sistema de coordenadas polares, conforme é mostrado esquematicamente na figura 53. A ferramenta é montada sobre uma guia, fixada em uma mesa giratória, de modo que a ferramenta pode se deslocar, juntamente com a mesa, sobre a base da máquina, e também girar em torno do centro da mesa. Dependendo do posicionamento da ferramenta, pode-se gerar superfícies côncavas ou convexas.

Este tipo de máquina é utilizado principalmente para a produção de superfícies esféricas ou anesféricas usadas na óptica.

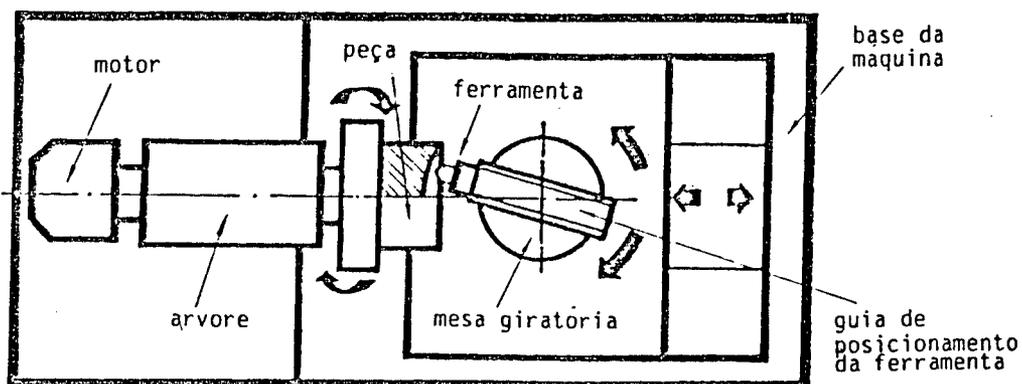


FIGURA 53 - Representação esquemática de uma máquina de contorno polar "R - θ ".

d) Geradora de arcos ("Chordal generator")

Nesta máquina, a posição do eixo da ferramenta fica sempre normal à superfície da peça, e assim não é necessário a correção dos erros geométricos da ferramenta. A representação esquemática deste tipo de máquina é mostrado na figura 54.

Conseguem-se excelentes resultados quanto aos erros de forma e acabamento superficial, atingindo-se erros de esfericidade de $0,08 \mu\text{m}$ e rugosidade R_{max} menores que $0,02 \mu\text{m}$ [42,43].

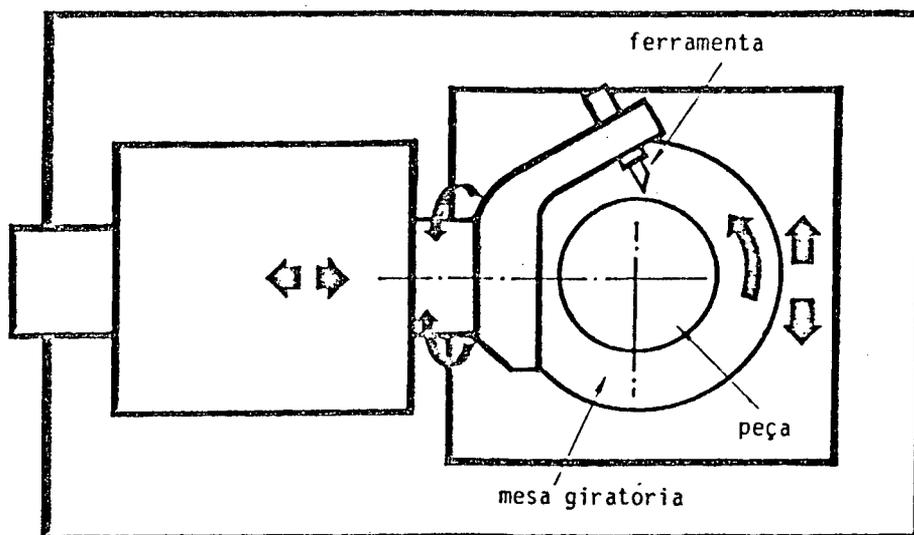


FIGURA 54 - Representação esquemática de uma máquina gerador de arcos

e) Fresadora de ultraprecisão

A configuração desta máquina é semelhante à de uma fresadora vertical convencional. Um mandril porta-ferramenta com ferramenta monocortante ("flycutter") é fixada na árvore, enquanto a peça é fixada na mesa, como está esquematicamente representado na figura 55. Quando os eixos de rotação da ferramenta e da peça são paralelos entre si, gera-se uma superfície plana. Mas, deslocando-se os eixos e dando-se uma certa inclinação no eixo da ferramenta, é possível se obter superfícies de simetria rotacional, côncava ou convexa.

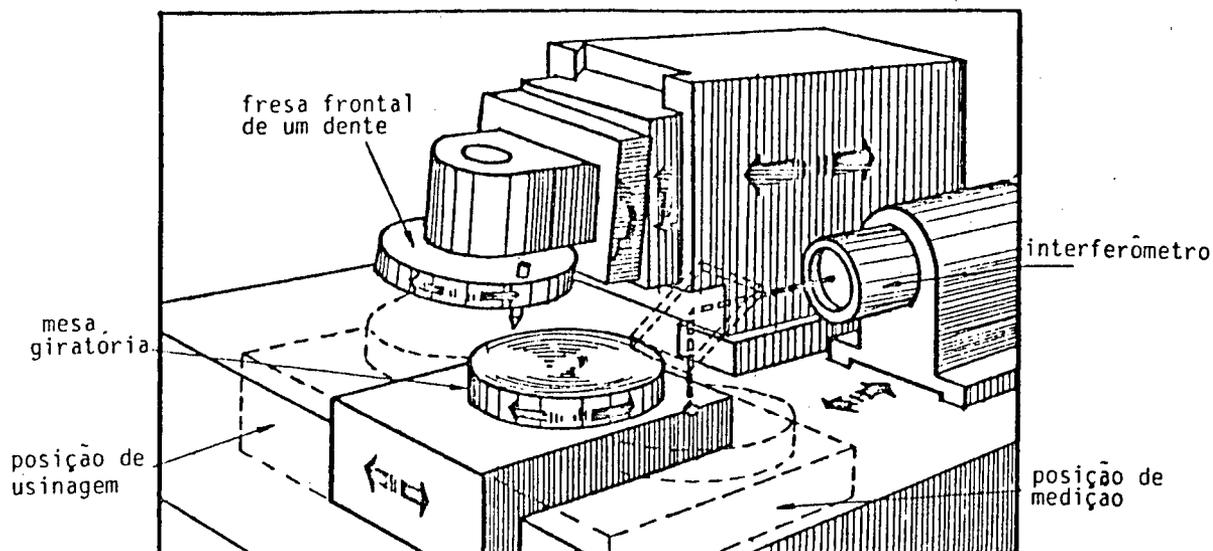


FIGURA 55 - Representação esquemática de uma fresadora de ultraprecisão.

f) Torno de precisão para ferramenta de diamante

É uma máquina com a mesma configuração de um torno convencional, mas dotado de um sistema de comando numérico (CNC), que possibilita o deslocamento simultâneo em duas direções perpendiculares, através da interpolação do movimento da ferramenta.

A ferramenta normalmente é de diamante monocristalino e propicia uma excelente precisão dimensional e acabamento superficial [44,45,46]. Na figura 46 apresenta-se um torno de precisão para ferramenta de diamante.

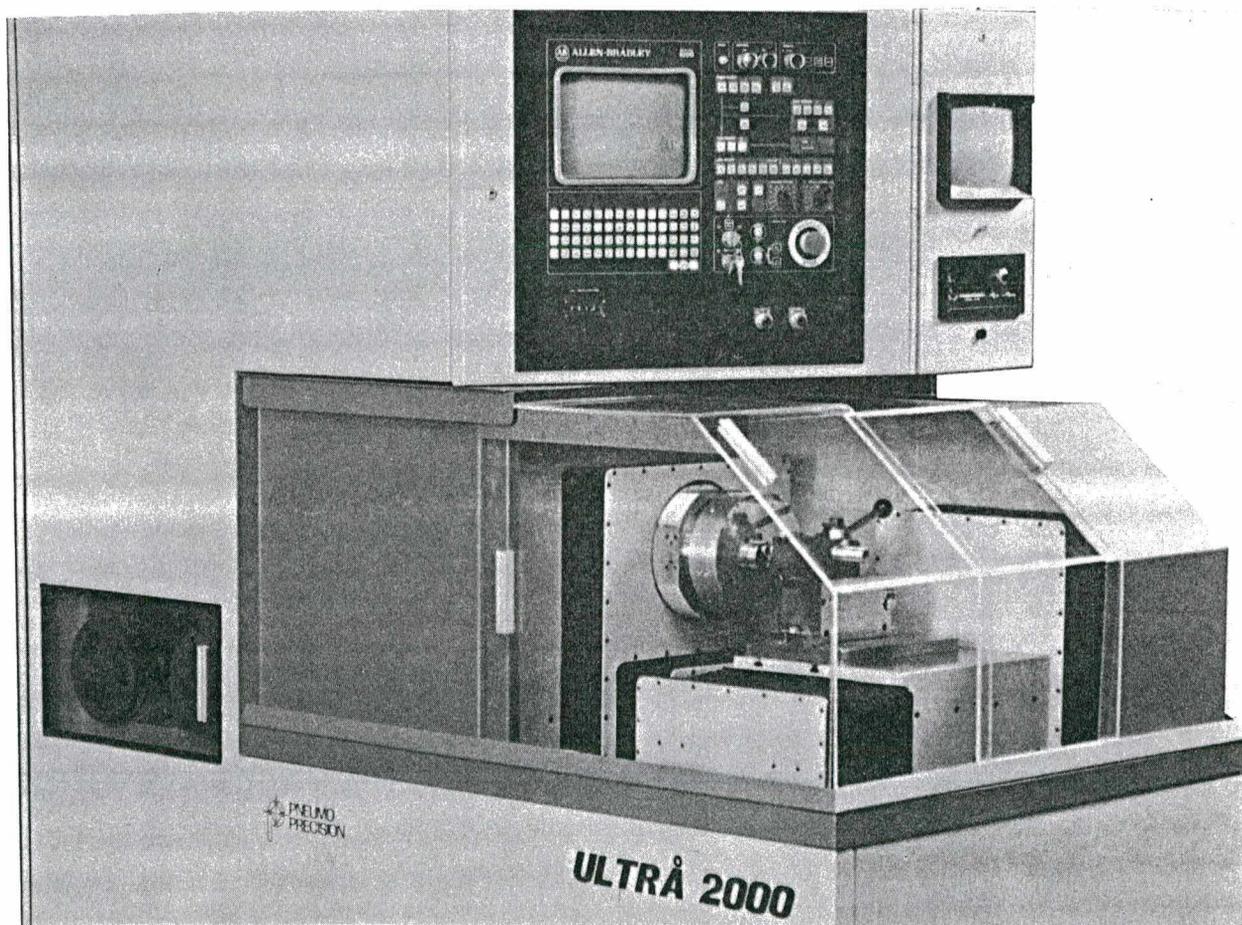


FIGURA 56 - Torno de precisão para ferramenta de diamante.

ANEXO 6

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS EQUIPAMENTOS

1) Fresadora universal

Modelo: FUW 250/IV

Fabricante: WMW - Ruhla

Dados técnicos:

Faixa de rotação: 45 a 2240 rpm (variação contínua)

Cone da árvore: ISO 40

Mesa de trabalho: 250 x 800 mm

Carga admissível: 120 kg

Faixa de avanços: 6,3 a 1250 mm/min

Potência absorvida: 5,5 kw

Peso bruto: 1520 kg

2) Mesa divisora circular

Fabricante: WMW

Dados técnicos:

Diâmetro da mesa: 300 mm

Altura da mesa: 120 mm

Precisão de leitura normal: 1 grau

Precisão de leitura fina: 2 segundos

Precisão de ajuste: \pm 5 segundos

Peso bruto: 55 kg

Carga admissível: 30 kg

Espaço ocupado pela mesa: 550 x 400 x 120 mm

3) Máquina de medir por coordenadas

Modelo: ZMC 550

Fabricante: Carl Zeiss - Oberkochen

Dados técnicos:

Faixa de operação: X = 0 a 550 mm

Y = 0 a 500 mm

Z = 0 a 450 mm

Carga admissível: 600 kg

Incerteza de medição: 1D = $\pm (1,0 + L/400)$ μm

3D = $\pm (1,5 + L/250)$ μm

Temperatura de trabalho: $20 \pm 3^{\circ}$ C

Resolução: 0,2 μm

Peso bruto: 2050 kg

4) Rugosímetro

Fabricante: Feinpruef Gmb H

Modelo: Perthometer M3A

Tipo de rugosidade: Rt e Ra

Indicação do valor: analógica

Resolução: 0,1 μm

Comprimentos de medição: 1,5 - 4,8 - 15 mm

Comprimentos de "cut-off": 0,25 - 0,8 - 2,5 mm

Faixas de medição: 0...0,25 - 0...2,5 - 0...25 μm (Ra)

0...1,00 - 0...10 - 0...100 μm (Rt)

5) Características da resina epoxi

Resina epoxi com aditivos especiais

Fabricante: Diamant Plasticmetal Ltda.

Marca: Diamant Moglice (pastoso)

Peso específico: $1,9 \text{ g/cm}^3$

Pressão admissível no deslizamento: 150 kgf/cm^2

Resistência e compressão: 950 kgf/cm^2

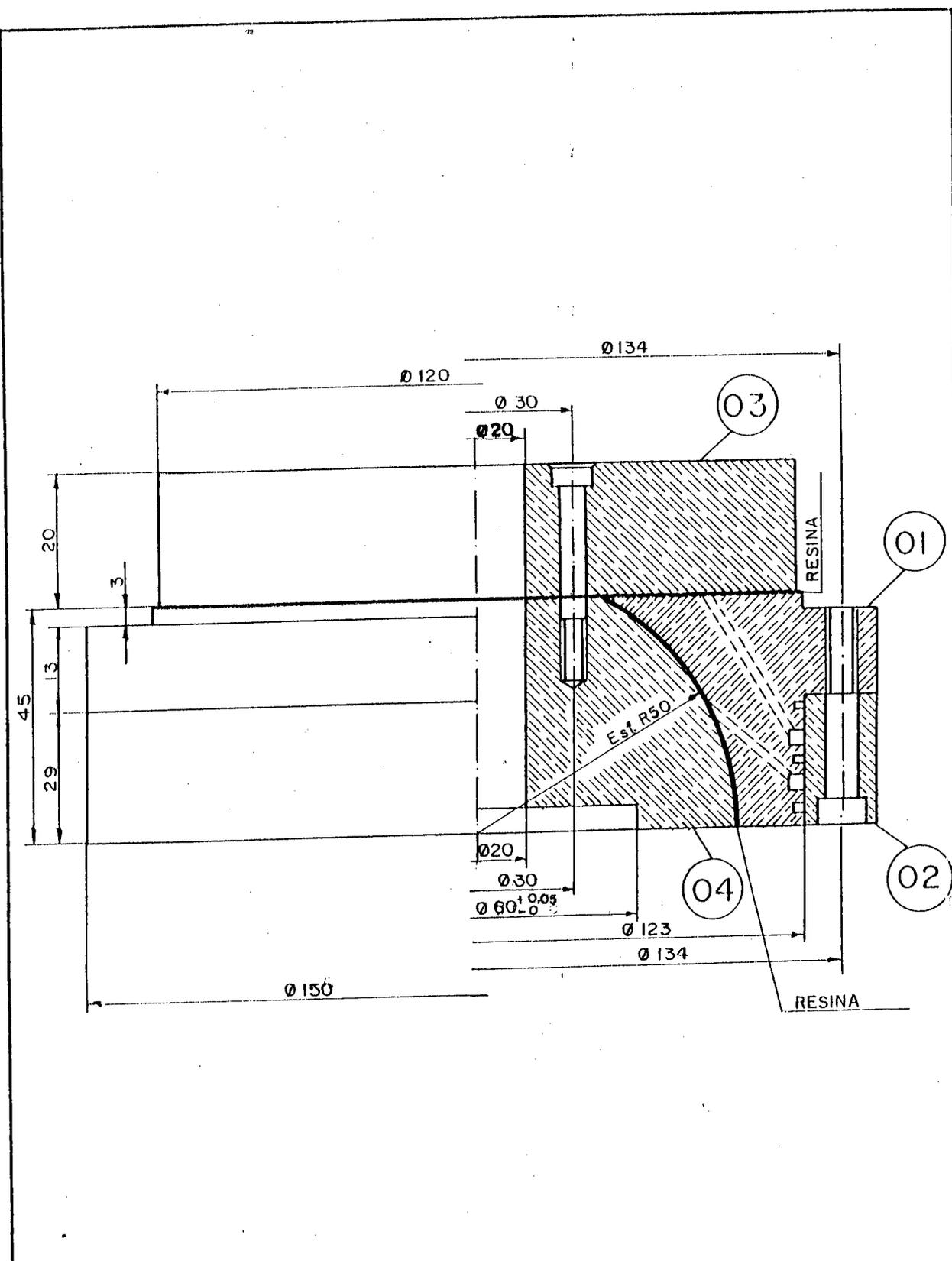
Temperatura admissível de serviço: -70°C até 80°C

Resistência química à: água, água salgada, óleos sintéticos e minerais, alcalinos moderados, emulsões de refrigeração, querosene, álcool, gasolina.

Contração após endurecimento: próxima a zero

Dureza Shore D: 80 - 85

Tempo de cura: 18 h (temperatura ambiente)



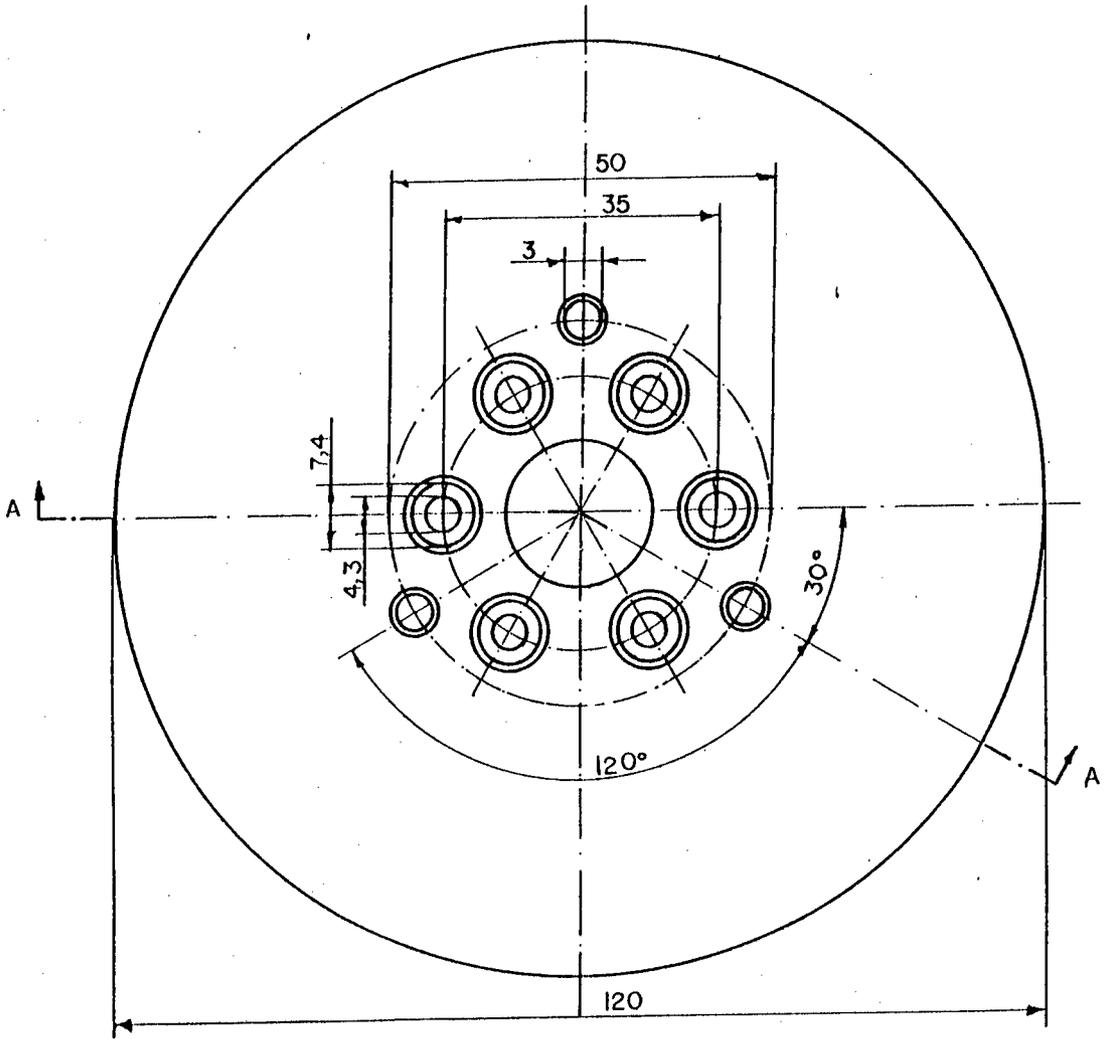
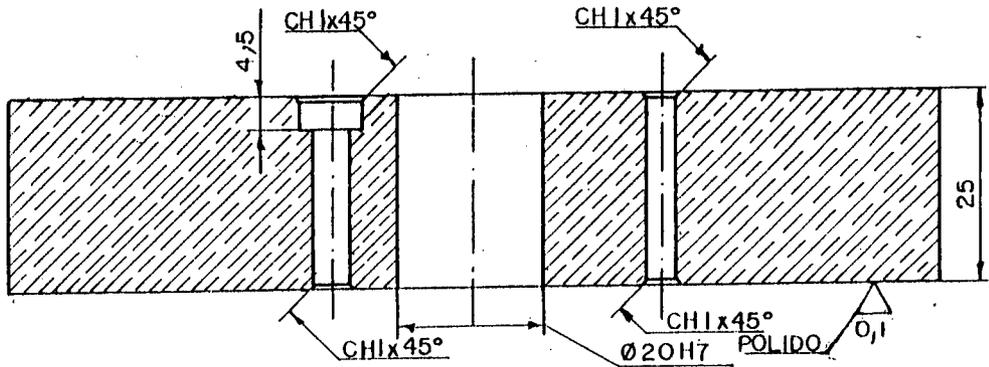
ORD.	DENOMINAÇÃO	QUAN	MATERIAL
05	VÁLVULA	2	
04	SEMI-ESFERA	1	BRONZE TM 23
03	MANCAL PLANO	1	BRONZE TM 23
02	BUCHA	1	BRONZE TM 23
01	ESTATOR	1	BRONZE TM 23

ESC.: 1:1
 PRAN.: 01
 04/02/1994
 LUCIANO

MANCAL SEMI-ESFÉRICO / PLANO

RESPONSÁVEL:
 SALVADOR

0,4 (0,1 POLIDO)

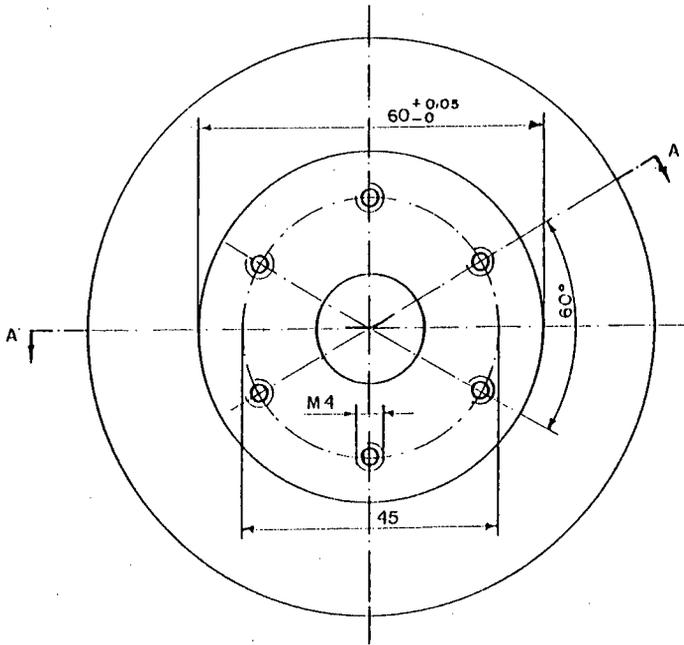


03	MANCAL PLANO	1	BRONZE TM 23
ORD.	DENOMINAÇÃO	QUAN.	MATERIAL

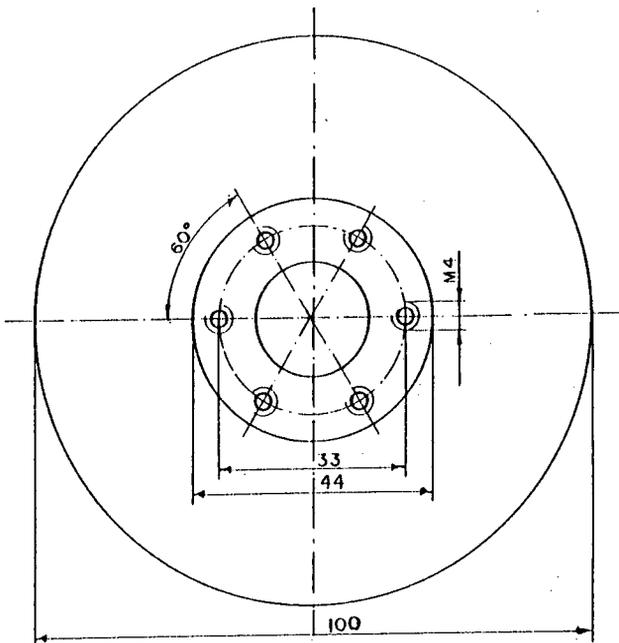
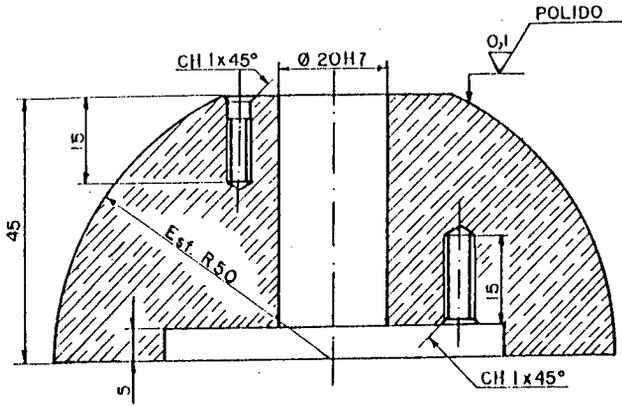
ESC. 1:1
 PRAN. 04
 04/02/1994

MANCAL SEMI-ESFÉRICO / PLANO

RESPONSÁVEL
 SALVADOR



0,1 (0,1 POLIDO)



04	SEMI-ESFERA	1	BRONZE TM 23
ORD.	DENOMINAÇÃO	QUAN.	MATERIAL
ESC. 1:1			RESPONSÁVEL SALVADOR
PRAN. 05			
04/02/1991			
LUCIANO			
MANCAL SEMI-ESFÉRICO / PLANO			