

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

**DESENVOLVIMENTO DE UMA MESA DE RETIFICAÇÃO PARA A
USINAGEM DE SAPATAS PLANAS CIRCULARES PARA MANCAIS
AEROSTÁTICOS**

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

MILTON PEREIRA

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 1998.

**DESENVOLVIMENTO DE UMA MESA DE RETIFICAÇÃO PARA A USINAGEM DE
SAPATAS PLANAS CIRCULARES PARA MANCAIS AEROSTÁTICOS**

MILTON PEREIRA

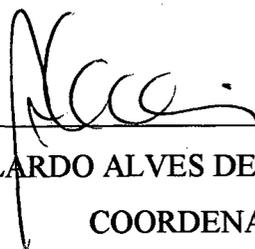
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
FABRICAÇÃO E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



WALTER LINDOLFO WEINGAERTNER, Prof. Dr-Ing.
ORIENTADOR

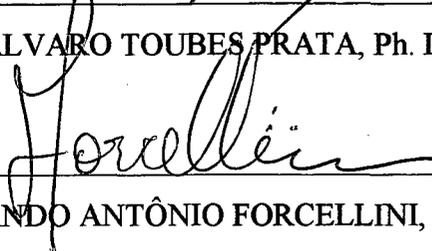


ABELARDO ALVES DE QUEIROZ, Ph. D.
COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA



ALVARO TOUBES PRATA, Ph. D. (Presidente)



FERNANDO ANTÔNIO FORCELLINI, Dr. Eng. Mec.



ROLF BERTRAND SCHROETER, Dr. Eng. Mec.

Aos meus pais: Milton (Miltão) e Adélia (Délhinha);
irmãos: João Baptista (Tista), Alex, André, Tatiana (Tati), Kátia (Kelly) e Éder;
e em especial ao meu filho Vitor.

AGRADECIMENTOS

A toda a minha família, pelo incansável apoio e confiança no êxito desta longa caminhada, em especial aos meus pais e irmãos, pela ótima educação e pelo incentivo ao prosseguimento da carreira acadêmica, mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao Professor Walter Weingaertner, pela amizade acima da orientação e pelo exemplo de humanidade e profissionalismo, que foram os principais alicerces montados para a execução desta e de muitas outras realizações que virão durante minha vida profissional.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.

Aos grandes amigos Rodrigo “guigo” Stoeterau e Luciano Moreira, pela paciência e valiosos ensinamentos desde os primeiros passos dados no laboratório.

Aos também novos “irmãos” agregados nesta caminhada, Ricardo Machado Peres, Durval “dudu” De Barba, Irapuan “ira” Santos, Jefferson “jeff” de Oliveira Gomes, Rodrigo Chibior e Cláudia “Clô” Silveira.

Aos fiéis escudeiros, ótimos amigos e parceiros de calabouço, Klaus, Gilberto, Sena, Thiago, Edwin, Marco, Samantha e Sílvia.

Aos excelentes profissionais e companheiros Nickolaus e Sr. Hamilton Silveira, pelas lições e incansável apoio.

Às sempre prestativas secretárias do laboratório Rosi e Sílvia.

À bibliotecária do laboratório Gerusa Duarte pela paciência e eterna amizade.

A todos os integrantes do laboratório, sempre prontos para dar “uma mão”. Entre muitos que aqui estão ou já partiram, destaque: Rolf, Hélio, Rodrigo Zeilmann, Otacílio, Daniel, Kleber, Basto, Hugo, Joel Martins, Bork, Eliene, Cleiton, Moacyr, Gilva, Catata, Animal, Sérgio, Márcio, Flávia, e todos os demais não citados, mas que sempre serão lembrados como ótimos companheiros.

ÍNDICE

| | |
|---|-------------|
| SIMBOLOGIA | ix |
| LISTA DE FIGURAS | xii |
| LISTA DE QUADROS | xv |
| RESUMO | xvi |
| ABSTRACT | xvii |
| 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS | 1 |
| 1.1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS | 4 |
| 2. REVISÃO SOBRE MANCAIS AEROSTÁTICOS | 5 |
| 2.1. HISTÓRICO | 5 |
| 2.2. ASPECTOS GERAIS | 5 |
| 2.3. APLICAÇÕES | 9 |
| 2.4. CARACTERÍSTICAS DE UM MANCAL AEROSTÁTICO | 10 |
| 2.5. TIPOS DE MANCAIS AEROSTÁTICOS | 11 |
| 2.6. TIPOS DE RESTRITORES DE ALIMENTAÇÃO DE AR | 14 |
| 2.7. MODELAMENTO MATEMÁTICO DE MANCAIS AEROSTÁTICOS | 16 |
| 2.8. SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES PARA UM CASO SIMPLIFICADO | 18 |
| 2.9. INFLÊNCIA DOS ERROS DE FORMA E QUALIDADE SUPERFICIAL DOS COMPONENTES EM MANCAIS LUBRIFICADOS A FILME FLUIDO | 19 |
| 3. OBTENÇÃO DE COMPONENTES DE PRECISÃO EM MÁQUINAS- FERRAMENTAS CONVENCIONAIS | 22 |
| 3.1. INTRODUÇÃO | 22 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2. TÉCNICAS DE CONTROLE..... | 23 |
| 3.3. SUBSTITUIÇÃO DE MOVIMENTOS DAS MÁQUINAS..... | 26 |
| 3.4. FABRICAÇÃO DE SAPATAS PLANAS CIRCULARES..... | 32 |
| 3.5. CINEMÁTICA ENVOLVIDA NA FABRICAÇÃO DAS SAPATAS..... | 36 |
| 3.6. ESTRUTURA DE FUNÇÕES DA MESA DE RETIFICAÇÃO..... | 38 |
| | |
| 4. GERAÇÃO E SELEÇÃO DE SOLUÇÕES PARA A MESA DE RETIFICAÇÃO..... | 40 |
| 4.1. INTRODUÇÃO..... | 40 |
| 4.2. GRANDEZAS DO PROCESSO REFERENTES ÀS FUNÇÕES DA MESA..... | 41 |
| 4.3. FUNÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO CIRCUNFERENCIAL DA MESA..... | 42 |
| 4.3.1. MANCAIS DE ESCORREGAMENTO..... | 43 |
| 4.3.2. MANCAIS DE ELEMENTOS ROLANTES..... | 44 |
| 4.3.3. MANCAIS MAGNÉTICOS..... | 48 |
| 4.3.4. MANCAIS A FILME FLUIDO..... | 49 |
| 4.3.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS TIPOS DE MANCAIS..... | 53 |
| 4.4. FUNÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO RADIAL DA MESA..... | 56 |
| 4.4.1. GUIAS DE ESCORREGAMENTO..... | 57 |
| 4.4.2. GUIAS DE ELEMENTOS ROLANTES [32]..... | 58 |
| 4.4.3. GUIAS A FILME FLUIDO..... | 59 |
| 4.4.4. COMPARAÇÃO ENTRE AS GUIAS LINEARES..... | 60 |
| 4.5. FUNÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO AXIAL DA MESA..... | 62 |
| 4.6. FUNÇÃO DE INCLINAÇÃO DA MESA..... | 62 |
| 4.7. FUNÇÃO DE FIXAÇÃO DA PEÇA A SER USINADA..... | 63 |
| 4.7.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS TIPOS DE SISTEMAS DE FIXAÇÃO..... | 64 |
| 4.8. FUNÇÃO DE CONTROLE DO AMBIENTE DE USINAGEM..... | 65 |
| 4.9. CONCEPÇÃO FINAL DA MESA DE RETIFICAÇÃO..... | 65 |
| | |
| 5. PROJETO DETALHADO DA MESA DE RETIFICAÇÃO..... | 67 |
| 5.1. INTRODUÇÃO..... | 67 |
| 5.2. PROJETO DO MANCAL ROTATIVO AEROSTÁTICO..... | 67 |
| 5.2.1. ESCOLHA DA CONCEPÇÃO DO MANCAL..... | 67 |

| | |
|--|-----------|
| 5.2.2. <i>DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS INICIAIS DO MANCAL</i> | 69 |
| 5.2.3. <i>ANÁLISE TEÓRICA DO MANCAL PLANO</i> | 70 |
| 5.2.4. <i>SISTEMA DE AJUSTE DA FOLGA DE TRABALHO DOS MANCAIS</i> | 73 |
| 5.2.5. <i>DESENHOS DO MANCAL ROTATIVO</i> | 74 |
| 5.3. PROJETO DA GUIA LINEAR AEROSTÁTICA | 75 |
| 5.4. PROJETO DO SISTEMA DE INCLINAÇÃO DA MESA..... | 76 |
| 5.5. PROJETO DA PLACA DE FIXAÇÃO | 77 |
| | |
| 6. FABRICAÇÃO E MONTAGEM DA MESA DE RETIFICAÇÃO | 78 |
| 6.1. INTRODUÇÃO | 78 |
| 6.2. USINAGEM DOS COMPONENTES..... | 78 |
| 6.3. MOLDAGEM DOS MANCAIS | 80 |
| 6.4. COLOCAÇÃO DOS RESTRITORES E AJUSTES FINAIS NAS SUPERFÍCIES | 83 |
| 6.5. CONTROLE GEOMÉTRICO DOS COMPONENTES DA MESA DE RETIFICAÇÃO .. | 85 |
| 6.6. MONTAGEM DA MESA DE RETIFICAÇÃO | 90 |
| | |
| 7. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO..... | 94 |
| 7.1. INTRODUÇÃO | 94 |
| 7.2. ENSAIO ESTÁTICO | 95 |
| 7.3. ENSAIO DINÂMICO..... | 98 |
| 7.4. ENSAIOS DE USINAGEM..... | 100 |
| 7.4.1. <i>CONDIÇÕES INICIAIS DO PROCESSO</i> | 101 |
| 7.4.2. <i>ENSAIO COM A RETIFICADORA EM CONDIÇÕES DE RETIFICAÇÃO</i> <i>CONVENCIONAL</i> | 103 |
| 7.4.3. <i>ENSAIO COM A MESA DE RETIFICAÇÃO MONTADA SOBRE A PLACA</i> <i>MAGNÉTICA DA RETIFICADORA</i> | 104 |
| 7.4.4. <i>ENSAIO COM A MESA DE RETIFICAÇÃO MONTADA SOBRE AS GUIAS</i> <i>LINEARES AEROSTÁTICAS</i> | 105 |
| 7.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE USINAGEM..... | 108 |

| | |
|--|------------|
| 8. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS..... | 110 |
| 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 113 |
| 10. ANEXO I..... | 119 |

SIMBOLOGIA

Letras Maiúsculas

| | | |
|------------------|--------------------------|--|
| B_s | mm | Largura do rebolo |
| D | μm | Diâmetro da sapata plana circular |
| D_h | μm | Conicidade da sapata plana circular |
| D_x | mm | Deslocamento da guia linear na direção X |
| D_y | mm | Deslocamento da guia linear na direção Y |
| D_l | mm | Comprimento do braço |
| D_θ | rad | Deslocamento angular do braço |
| E | - | Excentricidade relativa |
| F_r | N | Força sobre a pista do mancal de rolamento |
| K_a | $\text{N}/\mu\text{rad}$ | Rigidez angular |
| $K_{\text{máx}}$ | $\text{N}/\mu\text{m}$ | Rigidez máxima |
| P_a | N/mm^2 | Pressão atmosférica |
| P_d | N/mm^2 | Pressão na saída do restritor |
| P_{d1} | N/mm^2 | Pressão na saída do restritor |
| P_{d2} | N/mm^2 | Pressão na saída do restritor |
| P_{d3} | N/mm^2 | Pressão na saída do restritor |
| P_0 | N/mm^2 | Pressão de alimentação de ar |
| Q | m^3/s | Vazão de ar |
| R | mm | Raio externo da sapata circular |
| R_i | mm | Raio interno da sapata circular |
| R_0 | mm | Raio do rebaixo |
| U | m/s | Velocidade da placa |
| v_f | mm/rot | Velocidade de penetração do rebolo |
| v_s | m/s | Velocidade de corte do rebolo |

| | | |
|-------------------|-----|--|
| v_w | m/s | Velocidade de deslocamento da peça |
| X_n | - | Eixo X no sistema de coordenadas da peça |
| X_r | - | Eixo X no sistema de coordenadas de referência |
| $W_{m\acute{a}x}$ | N | Capacidade máxima de carga |
| Y_n | - | Eixo Y no sistema de coordenadas da peça |
| Y_r | - | Eixo Y no sistema de coordenadas de referência |
| Z_n | - | Eixo Z no sistema de coordenadas da peça |
| Z_r | - | Eixo Z no sistema de coordenadas de referência |

Letras Minúsculas

| | | |
|-------------------|---------------|---|
| a_e | mm | Profundidade corte axial |
| a_p | mm | Profundidade de corte radial |
| c | μm | Folga nominal |
| d_f | mm | Diametro do orifício do restritor |
| $d_{m\acute{a}x}$ | - | Vibração máxima dos elementos do rolamento de esfera |
| d_{min} | - | Vibração mínima dos elementos do rolamento de esfera |
| e | μm | Diferença de posição entre os centros do rotor e do estator |
| h | μm | Folga do mancal |
| h_c | μm | Folga do mancal |
| h_t | μm | Folga do mancal |
| $h_{(x)}$ | μm | Folga do mancal |
| h_0 | μm | Folga nominal do mancal |
| h_1 | μm | Folga do mancal |
| h_2 | μm | Folga do mancal |
| h^* | μm | Altura do rebaixo |
| n | - | Número de restritores |
| r_a | mm | Raio do mancal |

Letras Gregas

| | | |
|----------------|-----------------|------------------------------|
| β | μrad | Ângulo de conicidade da peça |
| δ_x | mm | Erro translacional x |
| δ_y | mm | Erro translacional y |
| δ_z | mm | Erro translacional z |
| ϵ_x | graus | Erro rotacional x |
| ϵ_y | graus | Erro rotacional y |
| ϵ_z | graus | Erro rotacional z |
| μ | Kg/m.s | Viscosidade do fluido |
| $\Lambda_s\xi$ | - | Parâmetro de alimentação |
| π | - | Pi |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Torno de ultraprecisão para usinagem de substratos de fotoreceptores. | 1 |
| Figura 2 - Retificação “plano-rotativa” sobre mancal aerostático [43]. | 2 |
| Figura 3 - Representação esquemática do campo de pressão em um mancal radial cilíndrico. | 6 |
| Figura 4 - Gráficos de rigidez de um mancal aerostático com variação do diâmetro do orifício do restritor e com variação da pressão de alimentação do gás. | 7 |
| Figura 5 - Máquina de medir por coordenadas [42]. | 9 |
| Figura 6 - Tipos de mancais aerostáticos. | 12 |
| Figura 7 - Tipos de carregamento sobre mancais aerostáticos. | 13 |
| Figura 8 - Carregamento nos mancais de escora e “Yate”. | 13 |
| Figura 9 - Tipos de restritores de alimentação de ar. | 15 |
| Figura 10 - Obtenção da equação de Reynolds. | 16 |
| Figura 11 - Representação esquemática das fontes geradoras de sustentação em mancais [7]. ... | 17 |
| Figura 12 - Solução de Reynolds para um caso simplificado. | 18 |
| Figura 13 - Efeito da conicidade sobre a rigidez de sapatas planas circulares [11]. | 20 |
| Figura 14 - Representação esquemática do sistema de controle da fresadora [18]. | 25 |
| Figura 15 - Comparação da trajetória descrita no fresamento de topo utilizando a técnica FCC. | 26 |
| Figura 16 - Barra de mandrilamento “Romicron” [19]. | 27 |
| Figura 17 - Divisor horizontal controlável [21]. | 28 |
| Figura 18 - Cabeçote de alta velocidade [22]. | 28 |
| Figura 19 - Cabeçotes de alta rotação acionados a ar [23]. | 29 |
| Figura 20 - Cabeçotes multifuso [24]. | 30 |
| Figura 21 - Morsa com ajuste angular nos três eixos [25]. | 31 |
| Figura 22 - Erros em um carro de uma guia linear prismática simples. | 33 |
| Figura 23 - Movimentos e erros em torno do um eixo de rotação do corpo com relação a um eixo de rotação ideal. | 33 |
| Figura 24 - Combinações de movimentos necessários para gerar um plano. | 34 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 - Movimentos necessários à ferramenta para a fabricação de sapatas planas circulares com conicidade controlada..... | 35 |
| Figura 26 - Exigências de qualidade de forma e superficial para uma sapata plana circular aerostática com folga otimizada [11, 12]. | 36 |
| Figura 27 - Representação dos parâmetros variáveis de entrada para os principais processos de retificação (DIN 8589 [27])...... | 37 |
| Figura 28 - Função total da mesa de retificação..... | 38 |
| Figura 29 - Primeiro desdobramento da função total da mesa de retificação..... | 39 |
| Figura 30 - Desdobramento final das funções da mesa de retificação..... | 39 |
| Figura 31 - Movimentos principais da mesa de retificação. | 41 |
| Figura 32 - Classificação de mancais rotativos quanto ao princípio de funcionamento [5,30]..... | 43 |
| Figura 33 - Exemplo de aplicação de mancais de escorregamento [25]. | 44 |
| Figura 34 - Mancais de elementos rolantes [28]. | 45 |
| Figura 35 - Classificação dos mancais de elementos rolantes [28]. | 46 |
| Figura 36 - Característica vibratória dos mancais de rolamento [29]. | 47 |
| Figura 37 - Mancal magnético. | 48 |
| Figura 38 - Esquema de um mancal magnético. | 49 |
| Figura 39 - Classificação de mancais a filme fluido. | 50 |
| Figura 40 - Ferramenta odontológica com mancal aerodinâmico..... | 51 |
| Figura 41 - Mancais hidrodinâmicos de um motor de automóvel..... | 52 |
| Figura 42 - Classificação das guias lineares..... | 57 |
| Figura 43 - Guia de escorregamento..... | 57 |
| Figura 44 - Guias de elementos rolantes [32]. | 58 |
| Figura 45 - Inclinação da mesa de retificação..... | 63 |
| Figura 46 - Configuração final da mesa de retificação..... | 66 |
| Figura 47 - Carregamento sobre um mancal esférico-plano..... | 68 |
| Figura 48 - Parâmetros necessários para o cálculo das características do mancal..... | 72 |
| Figura 49 - Sistemas para obtenção da folga do mancal..... | 74 |
| Figura 50 - Guia linear aerostática do carro transversal da máquina-ferramenta de | |

| | |
|---|-----|
| ultraprecisão em desenvolvimento no LMP. | 75 |
| Figura 51 - Componentes usinados da mesa de retificação. | 79 |
| Figura 52 - Varal para moldagem dos bujões restritores. | 80 |
| Figura 53 - Lapidadora de esferas. | 81 |
| Figura 54 - Lapidadora plana. | 81 |
| Figura 55 - Rotor e estator antes da moldagem. | 83 |
| Figura 56 - Seqüência para colocação dos restritores. | 83 |
| Figura 57 - Estator moldado. | 84 |
| Figura 58 - Sistema de medição. | 85 |
| Figura 59 - Condição da folga em um mancal esférico devido à excentricidade. | 88 |
| Figura 60 - Perfil de rugosidade do rotor plano. | 89 |
| Figura 61 - Perfil de rugosidade do estator plano. | 90 |
| Figura 62 - Conjunto do mancal rotativo antes da montagem. | 91 |
| Figura 63 - Controle da folga de montagem do mancal rotativo. | 92 |
| Figura 64 - Controle geométrico na montagem. | 92 |
| Figura 65 - Mesa de retificação montada. | 93 |
| Figura 66 - Montagem do ensaio estático. | 95 |
| Figura 67 - Curva de capacidade de carga axial do mancal aerostático. | 97 |
| Figura 68 - Curva de rigidez axial do mancal aerostático. | 98 |
| Figura 69 - Resposta em freqüência do mancal aerostático na direção axial. | 99 |
| Figura 70 - Rugosímetro. | 101 |
| Figura 71 - Variador de freqüência. | 102 |
| Figura 72 - Retificação do corpo de prova na retificadora convencional. | 103 |
| Figura 73 - Ensaio com a mesa de retificação sobre a placa magnética da retificadora. | 105 |
| Figura 74 - Montagem da mesa de retificação sobre as guias aerostáticas. | 106 |
| Figura 75 - Ensaio com a mesa de retificação sobre as guias aerostáticas. | 107 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|-----|
| Quadro 1 - Condições monitoradas nos processos de usinagem [17]. | 24 |
| Quadro 2 - Grandezas referentes às funções. | 42 |
| Quadro 3 - Comparação entre os tipos de mancais rotativos [5, 3, 29, 30]..... | 54 |
| Quadro 4 - Comparação entre as guias lineares. | 60 |
| Quadro 5 - Sistemas de fixação. | 64 |
| Quadro 6 - Equações para o projeto de mancais planos de sapata circular com alimentação anular e restritores de orifício sem rebaixo [12]. | 71 |
| Quadro 7 - Valores teóricos dos parâmetros operacionais do mancal plano. | 72 |
| Quadro 8 - Medição da forma da superfície esférica do rotor. | 86 |
| Quadro 9 - Medição de forma da superfície esférica do estator..... | 87 |
| Quadro 10 - Medição de forma da superfície plana do rotor. | 88 |
| Quadro 11 - Medição de forma da superfície plana do estator. | 89 |
| Quadro 12 - Rugosidade e planicidade do corpo de prova retificado sobre a mesa magnética da retificadora. | 103 |
| Quadro 13 - Rugosidade e planicidade do corpo de prova retificado sobre a mesa de retificação montada sobre a mesa magnética da retificadora. | 105 |
| Quadro 14 - Rugosidade e planicidade do corpo de prova retificado sobre a mesa de retificação montada sobre as guias aerostáticas. | 107 |
| Quadro 15 - Comparação total dos resultados de usinagem..... | 108 |

RESUMO

Mancais aerostáticos são componentes de sistemas mecânicos que possuem uma altíssima qualidade de trajetória nos seus movimentos, o que é essencial em equipamentos especializados como máquinas de medir por coordenadas e máquinas-ferramentas para usinagem de ultraprecisão, entre outros.

Suas características operacionais dependem exclusivamente da sua qualidade de fabricação, e devem possuir baixíssimos erros de forma e dimensional. Para atingir esse limite de qualidade, geralmente são empregadas máquinas especiais ou operações sucessivas de acabamento nos componentes do mancal.

Na busca pelo desenvolvimento de um dispositivo que permita a fabricação de sapatas planas circulares com conicidade controlada para mancais aerostáticos a partir de uma retificadora convencional, realizou-se todo um processo de projeto para a obtenção de uma “mesa de retificação” destinada à fabricação dessas sapatas planas circulares.

O processo de projeto utilizado envolveu as etapas de projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado, com posterior fabricação, montagem e qualificação do dispositivo.

Para a qualificação da mesa de retificação, foram realizados ensaios de carregamento para a obtenção das curvas de capacidade de carga e rigidez, ensaio dinâmico para a obtenção da frequência natural do mancal e ensaios de usinagem na retificadora para comprovação da qualidade final das peças produzidas.

ABSTRACT

Air bearings are mechanical systems components which have high accuracy and quality in their movements, what is essential in some applications, like coordinate measurement machines, ultraprecision machine tools and others.

Their operational characteristics depends exclusively on their manufacturing quality, which must have very low dimensional and shape errors.

When these quality goals are required, special machines or successive finishing operations on the bearing components are commonly used.

In order to develop a device which allows the manufacture of circular aerostatic pads with controlled conicity for air bearings, based on a conventional grinding machine, a set of processes to obtain a “grinding table” specifically designed to manufacture these circular aerostatic pads was developed.

The design process used involves: conceptual design, design brief, detail design, manufacturing, assembly and performance evaluation.

In order to evaluate the performance of the grinding table, some tests were applied. The static load carrying test was used to evaluate the load capacity and the stiffness. A dynamic test evaluated the natural frequency of the bearing. Finally, some grinding tests were used to evaluate the quality of the manufactured parts.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A aventura pode ser louca, mas o aventureiro para levá-la em frente deve ser cordato.

Gilbert Keith Chesterton (1874-1936).

1.1. INTRODUÇÃO

O Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina atua na área de projeto e fabricação de componentes e sistemas de precisão desde 1986, quando iniciou-se um trabalho de pesquisa aplicada a esta área com o objetivo inicial da construção de um torno para a usinagem de cilindros para máquinas fotocopadoras, figura 1.

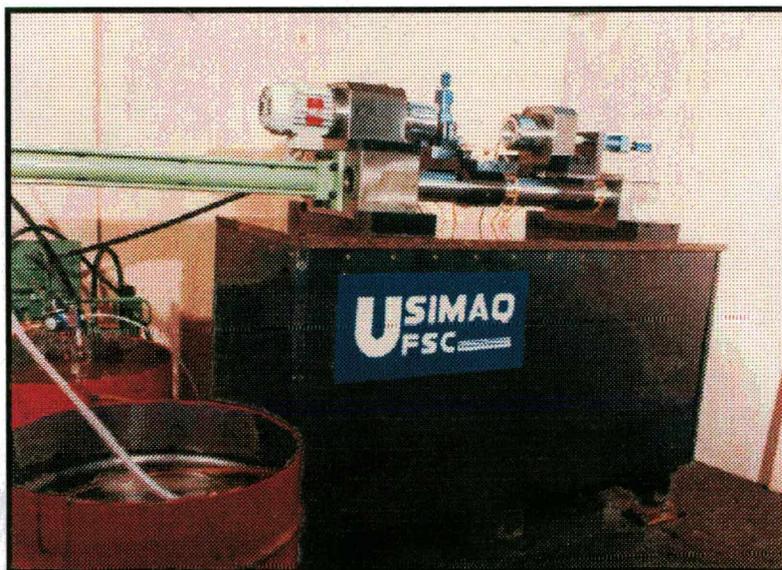


Figura 1 - Torno de ultraprecisão para usinagem de substratos de fotoreceptores.

A partir deste trabalho, foi criado um grupo de pesquisa com objetivo de aumentar o conhecimento nesta área. Desta forma, encadearam-se diversos outros trabalhos na área para possibilitar ao grupo obter experiência suficiente para executar projetos cada vez mais apurados.

O primeiro trabalho escrito desenvolvido dentro do contexto deste grupo, foi a

monografia apresentada em 1992 por Weingaertner [01], que descreve de forma geral os requisitos necessários para a construção de máquinas-ferramentas de precisão e ultraprecisão. Além disso, o trabalho apresenta os resultados obtidos com o torno de ultraprecisão desenvolvido no laboratório.

Ainda em 1992, Stoeterau [2] descreve em sua dissertação o comportamento de guias lineares cilíndricas aerostáticas. Em 1993, Rocha [3] apresenta um enfoque geral e dá contribuições para o projeto e fabricação de mancais aerostáticos rotativos.

Em 1994, Oliveira [4] e Müller [5] descrevem o projeto, a fabricação e a qualificação de mancais rotativos aerostáticos. Oliveira desenvolveu um mancal duplo-esférico com várias formas de alimentação de ar, e Müller desenvolveu um cabeçote aerostático para máquinas-ferramentas de ultraprecisão baseado em um mancal do tipo *Yate*.

Em ambos os trabalhos, há a descrição da aplicação de mancais rotativos aerostáticos como mesa de retificação plana, permitindo a obtenção de qualidade superficial e de forma nas peças usinadas bem superior à atingível somente pela retificadora.

Este processo foi transmitido pela primeira vez ao LMP por Harold Arneson em sua visita ao laboratório em 1987. Por contato feito durante esta visita, posteriormente Oliveira realizou um estágio junto à empresa americana *Professional Instruments Company*, adquirindo mais experiência no processo, que é mostrado na figura 2 .

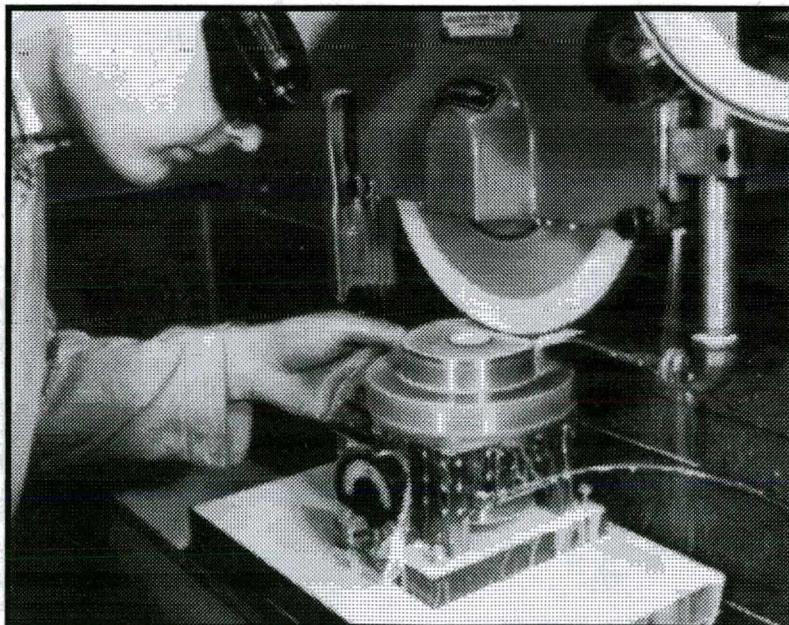


Figura 2 - Retificação “plano-rotativa” sobre mancal aerostático [43].

Müller utilizou esse processo para usinar as sapatas planas circulares do seu mancal *Yate*, mas teve alguns problemas de erros de forma devido ao mancal rotativo utilizado não possuir uma configuração e característica adequada, como descreve em seu trabalho.

O grande desafio encontrado por todos esses pesquisadores que fabricaram seus mancais no LMP foi a dificuldade de fabricação, pela necessidade de obtenção de tolerâncias muito apertadas de forma e dimensão nos componentes dos mancais. Como o LMP não é equipado com máquinas que permitem a fabricação das peças com estas tolerâncias, surge a necessidade de sucessivas operações de acabamento, o que torna a fabricação muito mais demorada e difícil.

Desta forma, dando continuidade às pesquisas sobre mancais aerostáticos e procurando amenizar o problema do laboratório na fabricação de componentes para mancais aerostáticos a partir de máquinas-ferramentas convencionais, far-se-á o desenvolvimento de uma mesa de retificação para a fabricação de sapatas planas circulares com baixos erros de forma e rugosidade.

Para a obtenção desta mesa de retificação, são necessários o desenvolvimento do projeto, a fabricação e a qualificação da mesma.

O projeto da mesa de retificação baseia-se na metodologia descrita por Pahl & Beitz [6], que definem um processo de projeto como sendo dividido em quatro etapas:

- definição da tarefa (identificação do problema a ser resolvido);
- projeto conceitual;
- projeto preliminar; e
- projeto detalhado.

Seguindo esta metodologia de forma genérica, o capítulo 2 do trabalho revisa os principais conceitos sobre mancais aerostáticos, com enfoque na grande necessidade de qualidades de forma e superficial para o bom funcionamento dos mesmos, caracterizando a “definição da tarefa” do projeto, que é a necessidade de obtenção de componentes de alta qualidade para os mancais.

No capítulo 3 são apresentadas formas de atingir as qualidades requeridas empregando máquinas-ferramentas convencionais, cuja utilização é um requisito fundamental deste projeto. Ao final deste capítulo, aborda-se com mais ênfase os requisitos necessários a uma mesa de retificação, concluindo numa estrutura de funções para o projeto da mesa.

No capítulo 4 são apresentadas algumas matrizes de comparação das funções da estrutura obtida anteriormente. Estas matrizes de comparação consistem nos diversos princípios de funcionamento dos componentes, que atendem às condições exigidas nas funções descritas. Em

cada uma destas funções é feito um estudo comparativo que indica qual é a melhor solução a ser empregada na mesa de retificação. Ao final é apresentada a concepção final da mesa.

Dentro da metodologia, os capítulos 3 e 4 compreendem o projeto conceitual da mesa de retificação.

O capítulo 5 trata do projeto preliminar e do projeto detalhado da mesa, onde são mostrados os conceitos e considerações utilizados no projeto da mesa.

O capítulo 6 do trabalho descreve a fabricação e a montagem da mesa de retificação. São apresentadas todas as dificuldades encontradas nestas etapas do trabalho, bem como o controle geométrico dos componentes após a fabricação e durante a montagem da mesa.

No capítulo 7 trata-se da qualificação da mesa de retificação, englobando ensaios estáticos, dinâmicos, e resultados de usinagem obtidos sobre a mesa.

Encerrando o trabalho, o capítulo 8 apresenta as conclusões de todo o trabalho e sugestões para novos desenvolvimentos.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos específicos os seguintes pontos:

1. Obtenção de uma concepção considerada “ideal” para a mesa de retificação;
 2. Apresentação de um projeto detalhado desta mesa de retificação;
 3. Fabricação e montagem da mesa de retificação dentro das tolerâncias especificadas no seu projeto detalhado;
 4. Comprovação experimental de valores calculados de capacidade de carga e rigidez; e
 5. Qualificação da mesa de retificação através, principalmente, de ensaios de usinagem comprovando a qualida superior das peças usinadas comparada às peças obtidas por retificação direta sobre a mesa da retificadora;
-

CAPÍTULO 2

REVISÃO SOBRE MANCAIS AEROSTÁTICOS

Aquele que deseja construir torres altas, deverá permanecer longo tempo nos fundamentos.

Anton Bruckner (1824-1896).

2.1. HISTÓRICO

A primeira vez que se ouviu falar no ar como possível lubrificante foi através de Hirn, em 1854, mas o primeiro mancal a ar foi feito por Albert Kingsbury, em 1889, que o apresentou na Conferência do Departamento Naval Americano em 1895. Tratava-se de um mancal radial, com 152,4 mm (6 polegadas) de diâmetro. Kingsbury testou-o utilizando tanto o ar quanto o hidrogênio como lubrificante, e seus resultados serviram como uma das primeiras confirmações da teoria de Reynolds [30].

O primeiro estudo teórico foi realizado por W. J. Harrison, em 1903, que revelou o efeito da compressibilidade, pela comparação dos dados de Kingsbury com a teoria hidrodinâmica [30].

O exemplo mais antigo que se conhece de um mancal a ar “pressurizado externamente”, é de 1904, desenvolvido por George Westinghouse. Neste, o rotor de uma turbina a vapor vertical era suportado por um mancal de escora aerostático [30].

A pesquisa sobre mancais aerostáticos ficou mais intensa nos anos seguintes à IIª Guerra Mundial, quando as características exclusivas destes tipos de mancais passaram a ser mais exploradas em máquinas e equipamentos [30].

2.2. ASPECTOS GERAIS

Mancais aerostáticos utilizam um filme fino de gás a alta pressão (4 a 15 kgf/cm²), para suportarem carregamentos. Como o ar tem viscosidade muito baixa, as folgas necessárias entre as superfícies dos mancais, para que estes funcionem de maneira eficiente, são muito pequenas,

ficando em torno de 5 a 25 μm .

Como é mostrado na figura 3, o gás a uma pressão P_0 é admitido na folga do mancal através de um meio de restrição, que geralmente consiste em um orifício que reduz essa pressão de alimentação até um valor P_d , medida logo na saída do restritor. Após liberado do restritor, o gás escoa através da folga do mancal, sofrendo uma diminuição progressiva de pressão até que encontre a pressão da atmosfera P_a no limite externo do mancal.

Dependendo da condição de restrição e também da condição de folga deste mancal, o campo de pressões formado pode assumir diversas amplitudes. Para uma mesma pressão de alimentação P_0 , se um mancal possui uma folga mínima h_1 , possuirá um campo de pressões caracterizado por uma pressão máxima na folga de P_{d1} na saída do restritor. Se esta folga for aumentada para um valor h_2 , sua pressão máxima cairá para um valor P_{d2} menor do que P_{d1} .

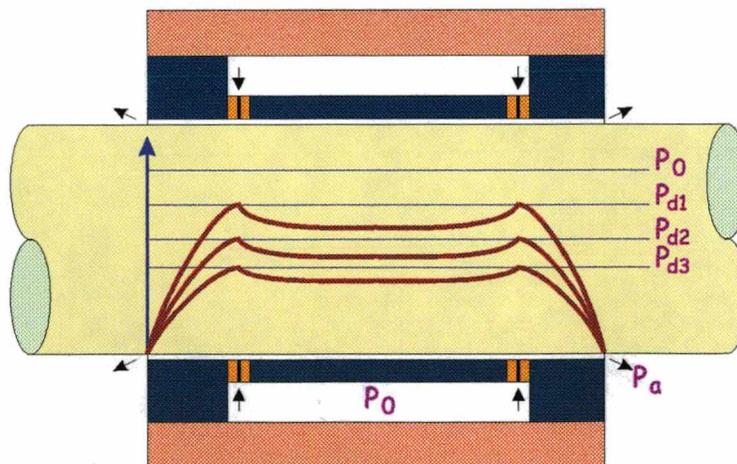


Figura 3 - Representação esquemática do campo de pressão em um mancal radial cilíndrico.

A importância do campo de pressões formado está no fato de que a capacidade de carga de um mancal aerostático é proporcional à área formada abaixo da curva que descreve a distribuição deste campo de pressões [7]. Assim, fica fácil de se identificar que, para uma mesma pressão de alimentação P_0 , é interessante que a pressão máxima da folga P_d seja otimizada. Para isso, a folga entre as partes do mancal deve ser muito pequena, o que justifica a grande dificuldade que se encontra na fabricação desses componentes.

O ponto ótimo da folga do mancal refere-se à máxima rigidez do mesmo. A rigidez

consiste na capacidade do mancal de sofrer variações no carregamento sem sofrer alterações significativas na folga. Quanto menor é a variação da folga do mancal para uma dada variação no carregamento, maior será sua rigidez [7].

Um dos objetivos principais do projeto de mancais aerostáticos consiste em escolher corretamente a dimensão do restritor associada com uma otimização da folga para a obtenção de uma condição ótima de rigidez, levando em consideração uma faixa de carregamento aplicado durante o regime de operação do mancal. Projetos errados resultam em baixa rigidez, operação ineficiente e alto custo de fabricação.

No ponto de máxima capacidade de carga do mancal, a rigidez do mesmo não é ótima. Desta forma, para projetos de máxima rigidez, perde-se um pouco na máxima capacidade de carga atingível pelo mancal em benefício da maior segurança de operação.

Outras considerações a respeito da rigidez sobre o ponto de vista da variação da pressão de alimentação do gás e do diâmetro do restritor podem ser observadas na figura 4, que sintetiza o trabalho apresentado por Boffey et al [8].

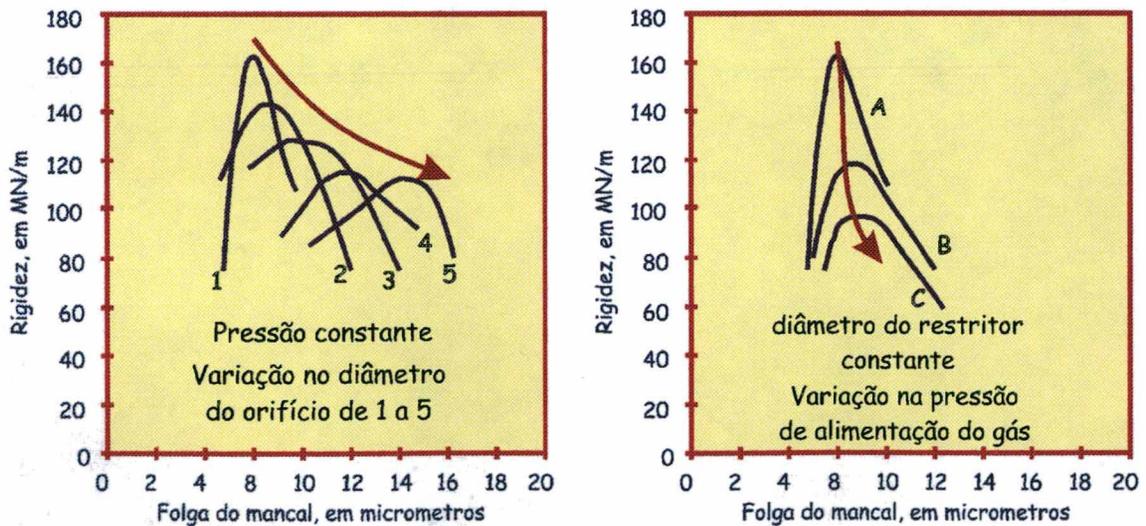


Figura 4 - Gráficos de rigidez de um mancal aerostático com variação do diâmetro do orifício do restritor e com variação da pressão de alimentação do gás.

No gráfico à esquerda da figura 4, para uma mesma pressão de alimentação, foram feitos diversos ensaios que descrevem a rigidez do mancal utilizando diferentes diâmetros do orifício de

alimentação de ar, variando de 0,15 a 0,28 mm.

Para cada diâmetro de restritor existe uma folga ótima do mancal que determina o ponto de rigidez máxima. Se uma das variáveis de projeto for o diâmetro do restritor, é necessário identificar qual é a folga ótima de operação do mancal em regime de trabalho. Valores de rigidez maiores são encontrados para diâmetros de restritores cada vez menores e, conseqüentemente, valores de folga do mancal também menores.

No gráfico à direita da figura 4, para um mesmo diâmetro de restritor, são utilizadas diferentes pressões de alimentação do gás. Nota-se que o ponto de folga ótima muda pouco comparado à variação do diâmetro do restritor, mas a amplitude da rigidez máxima do mancal é muito afetada. Na curva A foi aplicada uma pressão de alimentação de ar de 5,5 bar, para a curva B 4,5 bar e para a curva C 3,5 bar.

Teoricamente, uma solução para aumentar a rigidez do mancal seria aumentar a pressão de alimentação do gás. No entanto, para um limite de pressão de linha acima de 6 bar, os investimentos em equipamentos de geração e distribuição do gás se tornam muito altos e, dependendo do número de mancais que se deseja alimentar, ficam economicamente inviáveis.

Outro aspecto importante no projeto de mancais aerostáticos é o limite tecnológico encontrado para a fabricação dos mancais. Mesmo utilizando um diâmetro de restritor muito pequeno e prevendo uma folga de trabalho equivalente a esse restritor, se os processos de fabricação não permitirem erros de forma compatíveis com esses níveis de folga entre as partes do mancal, a operação do mancal será prejudicada. Isto acontece devido à não uniformidade do campo de pressões gerado na folga [9]. Outro fator a ser analisado é a dificuldade da fabricação dos restritores, que devem possuir a mesma dimensão para todos os furos de alimentação de ar.

As tolerâncias dimensionais e de forma na fabricação de mancais aerostáticos são muito estreitas, exigindo máquinas e métodos especiais de fabricação, associados a um controle de qualidade altíssimo.

Situações críticas são as encontradas em mancais que trabalham com altas velocidades relativas entre rotor e estator. Se um cabeçote aerostático operando em altas velocidades de rotação sofrer um carregamento que cause o contato entre rotor e estator, as conseqüências podem ser catastróficas, com grande perigo de acidente com operadores da máquina.

2.3. APLICAÇÕES

Com o crescente aumento da qualidade dos componentes produzidos na indústria, surge a necessidade de se trabalhar com tolerâncias geométricas e dimensionais cada vez mais apertadas. Isto faz com que a fabricação de componentes com alta precisão tenha uma crescente importância dentro dos processos produtivos, atuando quase sempre nos processos de acabamento.

Assim, tanto a fabricação de precisão quanto a inspeção dimensional, onde em ambos o comportamento das peças e dos equipamentos são diretamente influenciados pelos níveis de vibrações envolvidos, têm forçado uma constante busca pela melhoria dos mancais, principalmente no aumento da rigidez e na qualidade das trajetórias descritas pelos mesmos.

Devido às suas características, os mancais aerostáticos oferecem muitas vantagens nestas aplicações e já podem ser encontrados em equipamentos mais especializados como as máquinas de medir por coordenadas, figura 5.

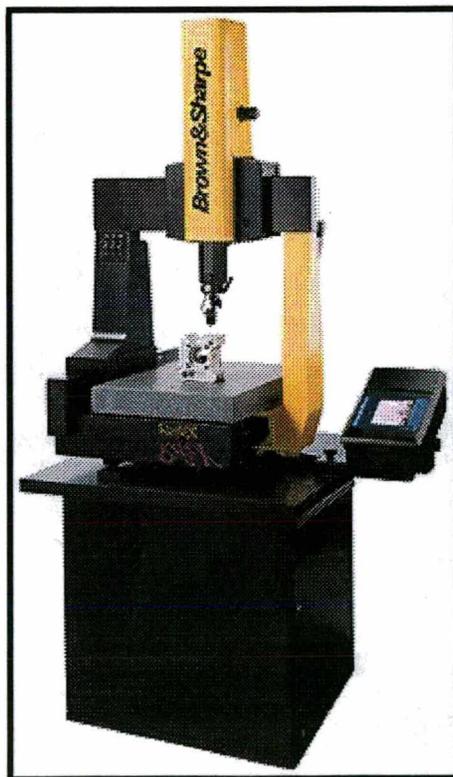


Figura 5 - Máquina de medir por coordenadas [42].

Mancais lubrificados a ar também são normalmente utilizados em aplicações que exigem altas velocidades relativas aliadas à precisão de movimento, como em cabeçotes de máquinas de ultra-precisão [5].

Em todas as aplicações onde há temperaturas críticas envolvidas, o óleo tem sua operação vetada devido às suas características de ponto de solidificação e ponto de chama, o que impõe limites de temperatura de operação para os mancais a óleo. Assim, mancais a gás podem operar em temperaturas bastante elevadas, como por exemplo em bombas para metais em fusão ou, num outro extremo, em temperaturas em torno de alguns graus Kelvin, como por exemplo em turbinas de expansão.

Mancais lubrificados a gás também são empregados em reatores nucleares, pois o óleo, quando em contato com radioatividade, se decompõe [10].

Outros campos onde mancais lubrificados a ar estão se destacando, são as indústrias alimentícias e têxteis, onde não pode haver contaminação seja por lubrificantes ou resíduos oriundos de desgaste entre os componentes [10].

2.4. CARACTERÍSTICAS DE UM MANCAL AEROSTÁTICO

As principais características dos mancais aerostáticos são [5]:

- PESO: mancais aerostáticos possuem uma elevada razão de desempenho por peso;
 - CUSTO: está associado à usinagem dos restritores e das apertadas tolerâncias de forma e geométricas exigidas nos projetos;
 - VIDA: possui vida infinita quando utilizado corretamente, já que não existe desgaste nos componentes;
 - RIGIDEZ: uma estimativa do valor da rigidez pode ser obtida dividindo-se a capacidade de carga por metade da folga nominal do mancal;
 - ATRITO: o atrito estático é zero e o atrito dinâmico pode ser desconsiderado para baixas velocidades relativas (< 2 m/s);
 - VEDAÇÃO: não é necessária;
 - RESOLUÇÃO DE POSICIONAMENTO: limitada pelo sistema de medição utilizado;
-

- **REPETIBILIDADE:** pode ser submicrométrica se não houver instabilidade pneumática, pulsos de pressão na alimentação ou variações de temperatura;
- **MANUTENÇÃO:** trocar regularmente os filtros de ar e sempre observar sua qualidade além de monitorar a pressão de alimentação de ar;
- **AMORTECIMENTO:** é de moderado a baixo;
- **DISPONIBILIDADE:** há poucos fabricantes no mundo;
- **PRECISÃO DE GIRO:** possui giro extremamente suave e com baixíssimo batimento radial;
- **GERAÇÃO DE CALOR:** pela viscosidade do ar ser muito baixa, o aquecimento viscoso não é significativo, sendo facilmente dissipado pelo fluxo de ar do mancal;
- **FABRICABILIDADE:** com algumas regras básicas, não é difícil projetar um mancal, mas é difícil fabricar um bom mancal;
- **PRÉ-CARREGAMENTO:** é necessário para que o mancal tenha rigidez bidirecional;
- **CAPACIDADE DE CARGA:** é boa por estar distribuída em uma grande área;
- **TAMANHO E CONFIGURAÇÃO:** o mancal por si ocupa pouco espaço, mas o sistema de alimentação de ar é de porte razoável;
- **ACESSÓRIOS DE SUPORTE:** redes de ar comprimido, filtros de ar, controle de pressão, sistemas de secagem de ar, compressor e estabilizador da pulsação da pressão na linha;
- **REQUISITOS DE MONTAGEM:** evitar trabalho sem pressão adequada;
- **COMPATIBILIDADE DE MATERIAIS:** cuidados especiais devem ser tomados quando se utilizam materiais que formam camadas espessas de óxido ou corrosão;
- **LIMITES DE VELOCIDADE E ACELERAÇÃO:** em altas velocidades de trabalho (> 10 m/s) a folga de trabalho deve ser suficiente para garantir que a potência de atrito seja menor que o dobro da potência de suprimento de ar;
- **SENSIBILIDADE AO MEIO DE TRABALHO:** são autolimpantes devido ao fluxo de ar; e
- **RESISTÊNCIA AO CHOQUE E À VIBRAÇÃO:** só perdem para os hidrostáticos.

2.5. TIPOS DE MANCAIS AEROSTÁTICOS

A classificação dos tipos de mancais aerostáticos inicia com a identificação das suas

formas básicas. Como mostrado na figura 6, uma primeira divisão dos mancais separa os mancais em radiais e planos. Os radiais caracterizam-se por possuírem superfícies de revolução.

Dependendo da aplicação a que se destina, cada mancal pode ser concebido utilizando-se as formas básicas ou combinações entre as formas básicas. Um fator que deve ser considerado para a escolha da concepção é a dificuldade de fabricação destas formas, bem como os diversos problemas de montagem.

As principais características que determinam a escolha de uma concepção são as direções de movimento e de carregamento que o mancal será submetido.

Quanto ao tipo de movimento, este pode ser de rotação, como em cabeçotes de máquinas, ou de translação, como nas guias lineares.



Figura 6 - Tipos de mancais aerostáticos.

As direções de carregamento podem ser axiais, radiais e de momento, como mostra a figura 7. Desta forma, cada mancal projetado possui direções preferenciais de carregamento, nas quais existe uma preocupação bem maior no que diz respeito à rigidez e capacidade de carga.

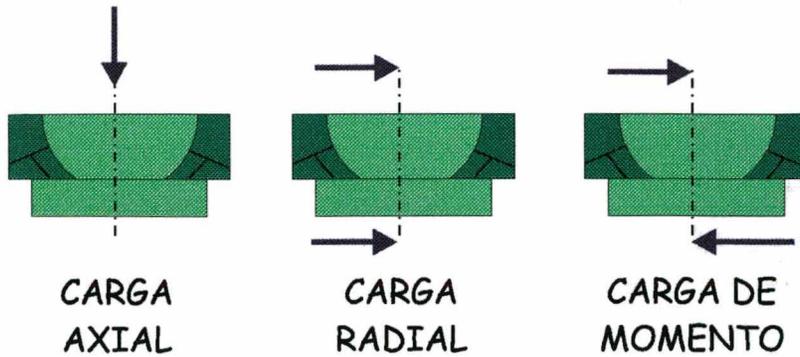


Figura 7 - Tipos de carregamento sobre mancais aerostáticos.

Um mancal de escora concebido a partir de um mancal plano de sapata circular com alimentação central só terá rigidez e capacidade de carga na direção perpendicular à sua superfície e com carregamento compressivo, como pode ser visto na figura 8.

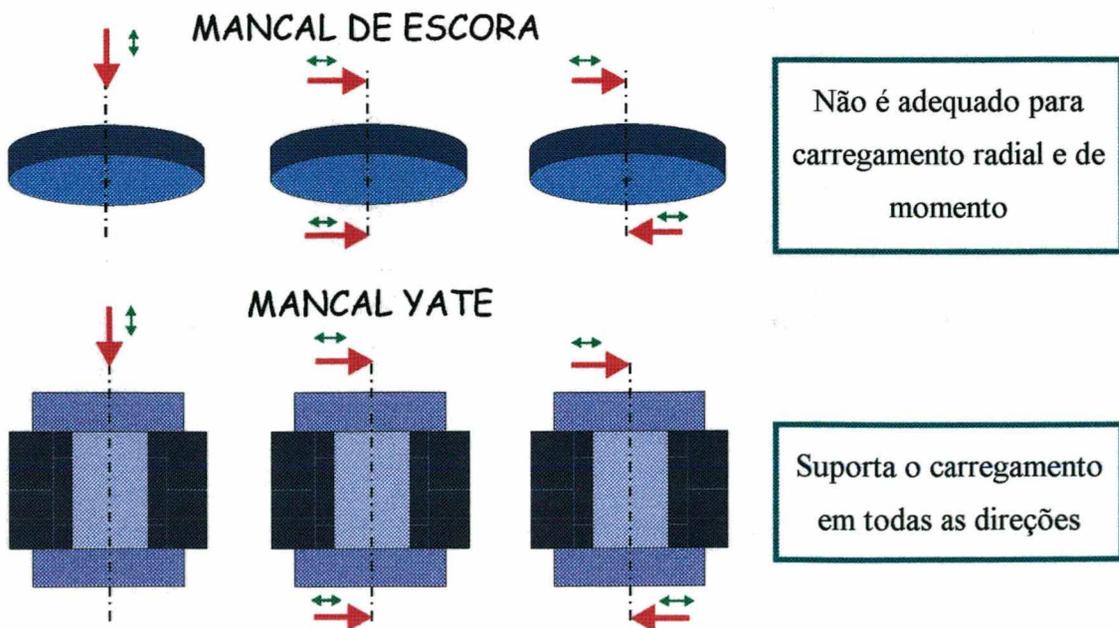


Figura 8 - Carregamento nos mancais de escora e “Yate”.

Neste tipo de mancal não há resistência quanto às cargas radiais e há muito pouca resistência às cargas de momento. De acordo com o que foi apresentado por Müller [5], um mancal do tipo “Yate” possui capacidade de carga e rigidez nos três tipos carregamento apresentados na figura 7, e em todas as direções.

De acordo com as concepções mais difundidas de mancais aerostáticos, destacam-se as formas básicas planas e os mancais radiais cilíndricos e esféricos.

Os mancais esféricos podem ser fabricados com baixos erros de forma a partir de máquinas relativamente simples, através de técnicas de lapidação. Os mancais radiais cilíndricos já exigem a utilização de retificadoras cilíndricas internas e externas com características operacionais bem controladas. Dependendo do caso, um trabalho final de lapidação pode ser necessário. Para os mancais planos, a fabricação passa pela retificação plana e posterior lapidação plana.

Mancais esféricos são bastante empregados por absorverem desalinhamentos de montagem, ao contrário dos mancais cônicos, que não permitem qualquer desalinhamento.

A grande dificuldade na fabricação destes componentes é a necessidade de máquinas e operadores especializados para que sejam atingidas as tolerâncias de fabricação exigidas.

2.6. TIPOS DE RESTRITORES DE ALIMENTAÇÃO DE AR [16]

As considerações referentes aos restritores de alimentação de ar vistas no item 2.2, são para mancais com restritores de orifício simples. Este tipo de restritor foi o primeiro a ser utilizado, mas apesar de ser mais fácil de fabricá-lo, não é o único tipo encontrado.

Na figura 9 são apresentados os tipos de restritores de alimentação de ar mais utilizados em mancais aerostáticos. Cada um proporciona um efeito diferente no campo de pressões gerado na folga do mancal.

O restritor de orifício sem rebaixo (figura 9-a) gera um fluxo turbulento de ar, onde a queda de pressão é devida à aceleração do ar quando ele se expande na folga. Este tipo de restritor não apresenta problema de instabilidade pneumática ou martelamento pneumático, que é um fenômeno associado à compressibilidade dos gases e à diferença entre as variações na folga do mancal e a resposta a essas variações por parte da alteração da pressão nos restritores. Se os restritores possuem um volume muito maior do que o volume encontrado na folga do mancal, fica

mais fácil de ocorrer este efeito.

Nos restritores de orifício com rebaixo, também é gerado um fluxo turbulento de ar, mas o ar não é diretamente enviado à folga. Antes de atingir a folga do mancal, o ar se expande no rebaixo na saída do orifício, equalizando a pressão e melhorando a formação do campo de pressões, como é representado na figura 9-b. Assim, fica mais fácil de ocorrer a instabilidade pneumática, já que o volume ocupado nestes rebaixos pode ser maior do que o volume dentro da folga. Se for corretamente projetado, este tipo de restrição pode apresentar valores de capacidade de carga até 30 % maiores do que os encontrados em restrição de orifício simples. Sua fabricação é um pouco mais difícil devido à necessidade de que os rebaixos possuam o mesmo volume.

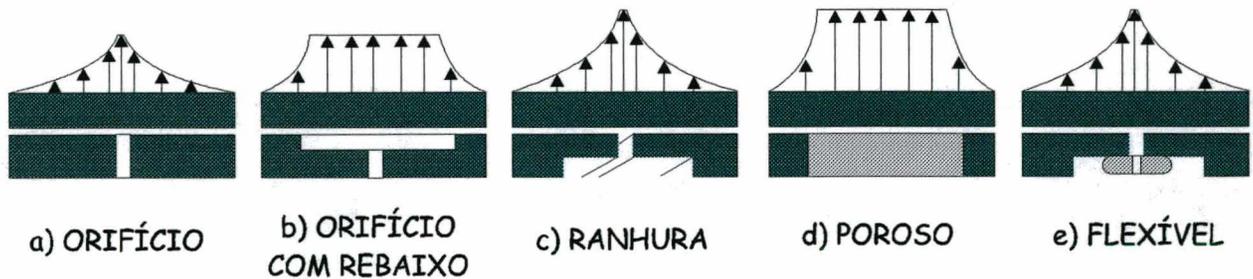


Figura 9 - Tipos de restritores de alimentação de ar.

Nos restritores de ranhura (figura 9-c) é gerado um fluxo laminar, o que proporciona uma capacidade de carga um pouco maior do que a encontrada em restritores de orifício. A ranhura pode ser produzida por usinagem, mas exige um trabalho bastante criterioso e preciso para garantir a qualidade posterior do escoamento do ar pela mesma.

Os restritores porosos (figura 9-d) levam aos melhores valores de capacidade de carga e rigidez para um mesmo mancal e não causam problemas de instabilidade pneumática. Geralmente são utilizados na forma de insertos colados em toda a superfície do mancal, ou mesmo com toda a superfície porosa. No seu princípio de funcionamento, cada poro funciona como um restritor de orifício individual, tornando praticamente toda a superfície com sustentação máxima. A maior dificuldade encontrada neste tipo de restritor é a garantia de que a porosidade em todos os restritores seja a mesma, para que a pressão na saída do restritor seja a mesma em todos os pontos. Isto torna este tipo de restritor mais caro de ser fabricado.

O restritor flexível (figura 9-e) varia o diâmetro conforme as condições de carregamento do mancal para otimizar sua rigidez, mas é o mais caro e de mais difícil fabricação.

2.7. MODELAMENTO MATEMÁTICO DE MANCAIS AEROSTÁTICOS

Segundo a figura 10, o modelamento matemático de mancais aerostáticos tem início nas equações básicas da mecânica dos fluidos que, adaptadas às hipóteses simplificativas referentes à condição de lubrificação, resultam na geração da equação geral da teoria da lubrificação, que foi inicialmente desenvolvida por Reynolds, e recebe seu nome.

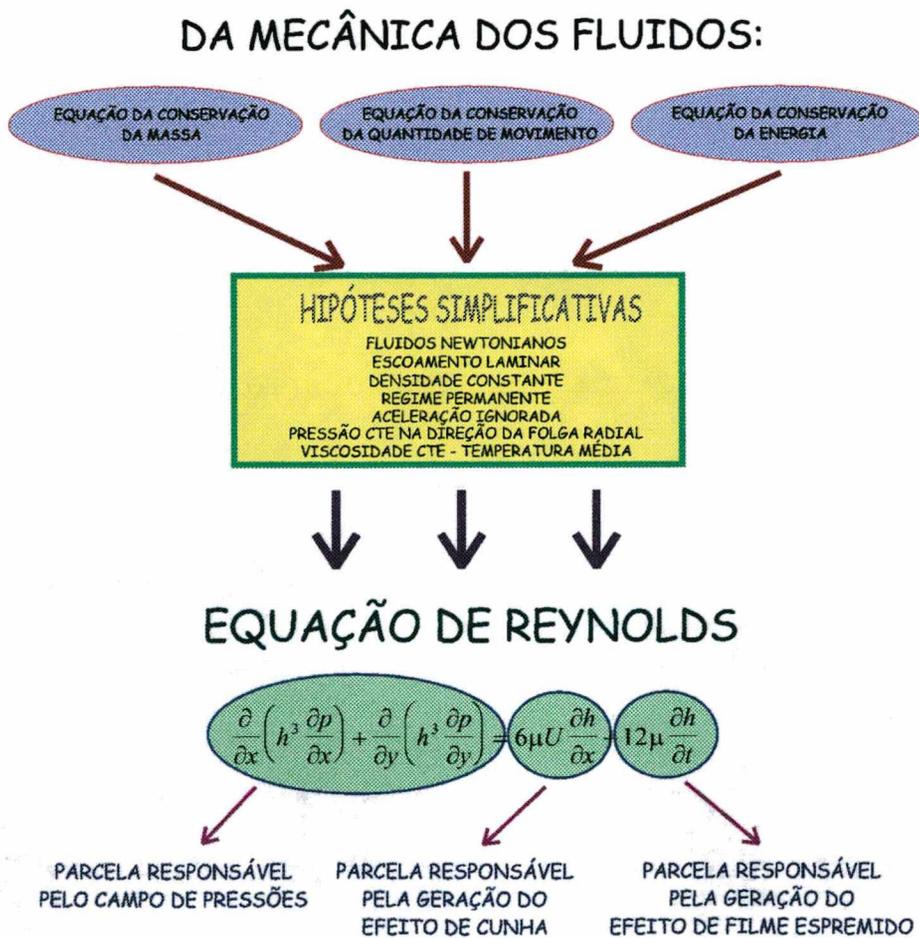


Figura 10 - Obtenção da equação de Reynolds.

O lado esquerdo da equação de Reynolds está associado ao campo de pressões, de acordo com a condição de lubrificação encontrada no mancal. O lado direito é responsável pelos efeitos de sustentação do mancal.

Existem três fontes geradoras de sustentação para um mancal a filme fluido:

- **EFEITO DE CUNHA:** Este efeito, muito encontrado em guias de escorregamento e em mancais fluidodinâmicos, consiste na formação do campo de pressões no interior de uma cunha, que é formada entre as partes de um mancal sob a ação de movimento relativo entre estas partes, como mostra a figura 11-A;
- **EFEITO DE FILME ESPREMIADO:** Este efeito acontece quando se tenta aproximar duas superfícies separadas por um fluido. Este fluido gera uma força de reação que mantém temporariamente as superfícies fora de contato. Este efeito só é significativo para mancais lubrificados a óleo, cuja viscosidade é suficientemente alta para evitar um escoamento muito rápido do óleo para fora da fenda do mancal. Um exemplo onde acontece este efeito é a biela de motores a combustão interna. Devidamente lubrificada, a superfície do pino do pistão nunca entra em contato com a da biela, evitando desgaste destas peças durante a operação do motor. A maior parcela de desgaste acontece na partida do motor, quando não há óleo suficiente na folga para gerar o efeito de filme espremido (figura 11-B); e
- **INJEÇÃO DE PRESSÃO NA FOLGA DO MANCAL:** Para gerar o campo de pressões pode-se também injetar fluido pressurizado dentro da folga do mancal, como acontece nos mancais aerostáticos e hidrostáticos. Em termos de modelamento, este efeito é considerado através das condições de contorno do mancal. Na posição dos restritores considera-se uma pressão inicial P_a , que é a pressão de alimentação do mancal corrigida das perdas de carga. Na figura 11-C há um exemplo de um mancal de escora com alimentação pressurizada externamente.

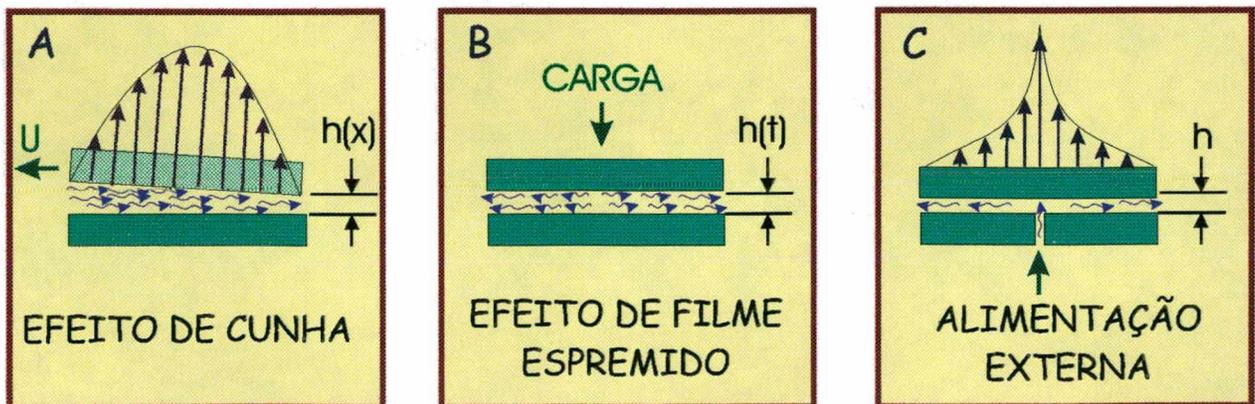


Figura 11 - Representação esquemática das fontes geradoras de sustentação em mancais [7].

2.8. SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES PARA UM CASO SIMPLIFICADO [7]

Considerando um mancal aerostático de escora baseado em uma sapata circular com alimentação central, como mostra a figura 12, serão deduzidas as equações que descrevem o campo de pressões formado, a vazão e a capacidade de carga deste mancal.

As hipóteses simplificativas aplicadas sobre a equação de Reynolds para coordenadas cilíndricas eliminam as parcelas referentes aos efeitos de cunha e filme espremido, pois não estão presentes nesta situação do mancal, já que não há movimento relativo entre os componentes. Uma outra simplificação aplicada refere-se ao fato de que, nesta condição, não há variação da pressão no mancal para um mesmo valor de raio, ou seja, a pressão é constante em todos os pontos sobre uma mesma circunferência concêntrica ao restritor de alimentação de ar.

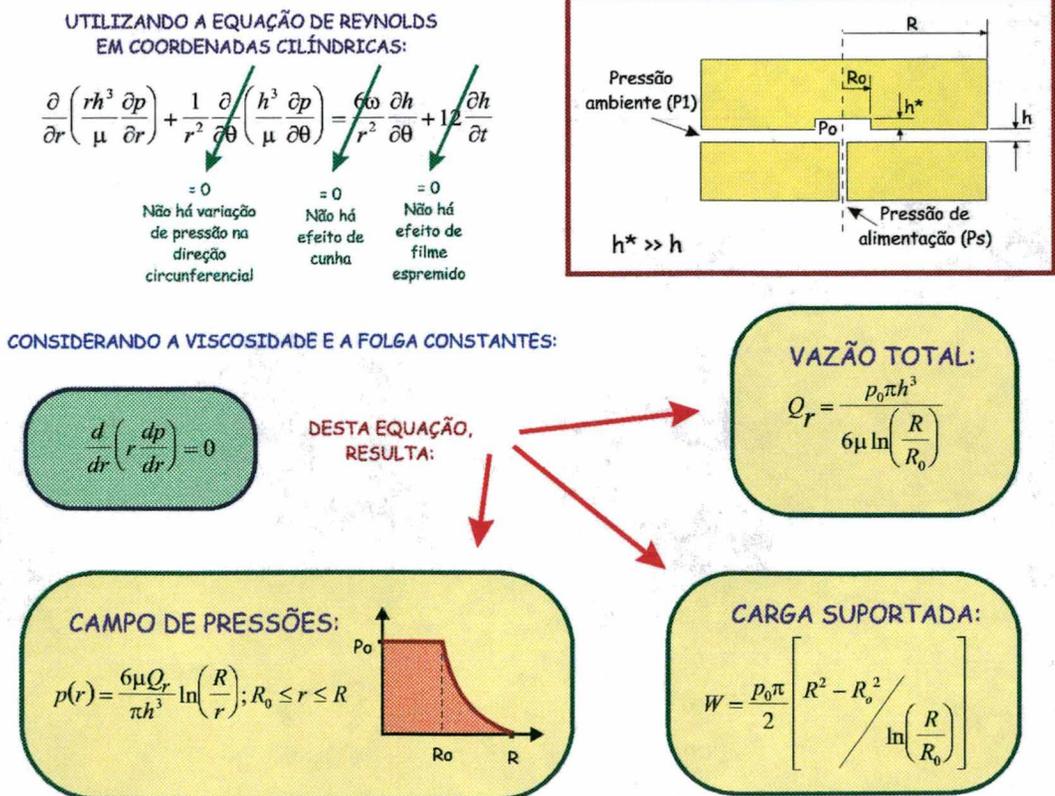


Figura 12 - Solução de Reynolds para um caso simplificado

Considerando a viscosidade (μ) e a folga (h) constantes, chega-se a uma equação bastante simplificada que, quando derivada com relação à direção radial do mancal, resulta na representação teórica do campo de pressões formado no interior da folga do mancal. Para o caso estudado, como existe um rebaixo, considera-se a pressão constante dentro deste rebaixo, sendo reduzida dentro da folga até que se alcance o limite externo do mancal, onde a pressão é a atmosférica. Assim, a pressão dentro do mancal se comporta como mostra o gráfico na figura 12, sem considerar efeitos de aceleração do escoamento, que aparecem em vazões altas.

A pressão dentro do rebaixo não é igual à pressão de alimentação do mancal devido à perda de carga existente no restritor de alimentação de ar.

Do campo de pressões, é possível obter o equacionamento que descreve a vazão e a capacidade de carga do mancal, como mostra a figura 12.

É importante observar a dependência destas características do mancal com relação à folga do mesmo. No caso da capacidade de carga, esta dependência está implícita na pressão p_0 dentro do rebaixo, que depende exclusivamente da perda de carga sofrida pelo fluido que, por sua vez, depende da folga do mancal. A carga suportada pode ser expressa em função da vazão e , neste caso, p_0 deve ser substituído por Q_r . Feito isso, constata-se que W é inversamente proporcional a h^3 , destacando a importância da folga também na carga suportada.

A folga nas equações aparece com altíssimo grau de significância, sempre acompanhada de uma potência de terceira ordem (h^3), o que reforça a necessidade de se obter uma folga uniforme e com um valor corretamente especificado na fabricação de mancais aerostáticos.

2.9. INFLUÊNCIA DOS ERROS DE FORMA E QUALIDADE SUPERFICIAL DOS COMPONENTES EM MANCAIS LUBRIFICADOS A FILME FLUIDO

Geralmente, o modelamento matemático aplicado aos mancais se refere à condição de superfícies ideais, ou seja, sem quaisquer erros de forma e sem influência da rugosidade.

Com relação aos erros de forma, pode até acontecer o caso destes serem favoráveis à formação do campo de pressões no mancal, como mostra o estudo realizado por Rehsteiner [11], que gerou sapatas circulares com alimentação central com superfícies que apresentam desvios de forma côncavos e convexos mínimos. Um dos seus resultados pode ser observado na figura 13,

que descreve o comportamento em termos de rigidez radial de sapatas planas com folgas com formas variadas.

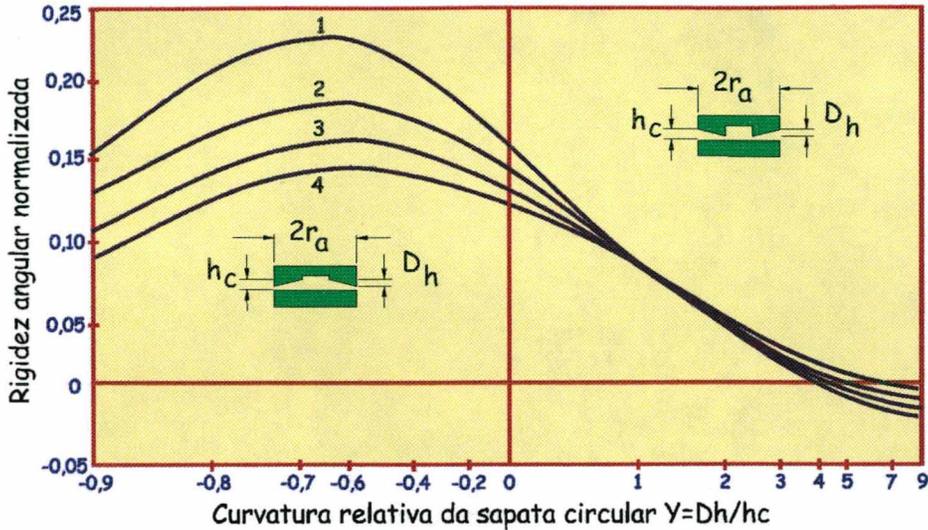


Figura 13 - Efeito da conicidade sobre a rigidez de sapatas planas circulares [11].

As curvas numeradas de 1 a 4 representam 4 crescentes níveis de carregamento imposto à sapata durante os ensaios, varrendo a faixa de carga suportada pelo mancal ensaiado.

Pode-se notar nesta figura que há um ponto de máxima rigidez quando a sapata assume uma forma côncava com curvatura de aproximadamente $D_h/h_c = 0,7$. Isto quer dizer que, para um mancal que possui uma folga de trabalho de $10 \mu\text{m}$, deverá haver uma diferença entre alturas desta folga da extremidade para o centro da sapata de $7 \mu\text{m}$.

Uma outra observação importante diz respeito ao efeito contrário, quando o erro de forma torna a superfície convexa. Neste caso, a rigidez cai de forma acentuada, o que é indesejável.

Com relação à rugosidade, Slocum [12] sugere que a soma dos picos máximos de rugosidade de ambas as superfícies não deve ultrapassar a um quarto do valor nominal da folga. Apesar de haver esta recomendação, trabalhos como o de White [13] sugerem que a rugosidade ajuda nas características dos mancais a filme fluido. Neste trabalho, um determinado perfil de rugosidade foi gerado e modelado junto à equação da lubrificação. Como resultado, foi obtido que quanto maior a rugosidade dos componentes, maior seria a capacidade de carga do mancal. Mesmo se referindo a guias de escorregamento, esta afirmação pode ser estendida no que se

refere ao movimento relativo existente entre o fluido lubrificante e as superfícies do mancal.

Diversos pesquisadores procuram encontrar a relação que existe entre o perfil de rugosidade dos componentes e sua condição de operação na lubrificação. Com isso, surgem muitas dúvidas que continuam sendo estudadas (Whitehouse [14]), como:

- Quanto a textura da superfície ajuda no seu desempenho na condição de lubrificação?
- Quais os parâmetros verticais de rugosidade que são importantes de serem explicitados?
- Quais os parâmetros horizontais de rugosidade que são importantes?
- É importante definir se a rugosidade predominante, caso exista, deve estar na peça em movimento ou na estacionária ou então nas duas superfícies de maneira igual?
- Qual é o efeito da posição? A isotropia ou a anisotropia são importantes? Se forem, há um valor preferencial?
- A rugosidade deveria ser aleatória ou periódica? Deveria ser uma combinação das duas?
- Qual é a influência da direcionalidade dos picos de rugosidade?
- Como um sulco ou uma saliência da superfície, não provocados pelo processo de fabricação, podem alterar a eficiência da lubrificação?

Como não existe uma certeza quanto à influência de erros de forma e qualidade superficial nos componentes de mancais lubrificadas a filme fluido, busca-se sempre alcançar a condição ideal, ou seja, uma fabricação das peças o mais próximo possível do perfil teórico estudado. Como as folgas exigidas entre as partes nos mancais aerostáticos são muito pequenas, menores ainda deverão ser os erros de fabricação deixados pelos processos, tanto em forma quanto em rugosidade.

Aliado a todos esses aspectos citados, está o desafio de fabricar estes componentes nas tolerâncias especificadas minimizando os custos envolvidos nesta fabricação.

CAPÍTULO 3

OBTENÇÃO DE COMPONENTES DE PRECISÃO EM MÁQUINAS-FERRAMENTAS CONVENCIONAIS

Faça as coisas o mais simples que você puder, porém não as mais simples.

Albert Einstein (1879-1955).

3.1. INTRODUÇÃO

A maior limitação para a fabricação de mancais aerostáticos é a falta de equipamentos adequados à obtenção das tolerâncias dimensionais, de forma e qualidade superficial exigidas nos projetos. Como foi visto, a condição de operação ideal de mancais aerostáticos só é alcançada quando os seus componentes possuem a máxima fidelidade com o projeto, ou seja, quando estes possuem formas e dimensões o mais próximo possível do ideal.

Quando se possui máquinas-ferramentas que permitem que as tolerâncias exigidas em projeto sejam alcançadas, uma fabricação criteriosa dos componentes é suficiente para que se atinja esta qualidade especificada.

O maior problema na fabricação acontece quando se tenta usar componentes de alta precisão sem máquinas de alta precisão.

Cada máquina-ferramenta é especificada pelo seu fabricante para atingir um limite determinado de precisão das peças produzidas. Este limite está diretamente relacionado com a precisão dos componentes que constituem a própria máquina. Desta forma, o fabricante tem noção dos erros esperados e das limitações do seu equipamento. Para que seja possível produzir peças com qualidade superior à qualidade “limite” que a máquina-ferramenta permite, existem duas alternativas: a utilização de técnicas de controle específico para compensação de erros; e a aplicação de dispositivos mais precisos nas máquinas, com a finalidade de substituir os movimentos nas direções sensíveis do processo.

3.2. TÉCNICAS DE CONTROLE

A utilização de técnicas de controle é um campo bastante estudado e vem sendo cada vez mais empregado. A variação de estratégias de controle e compensação de erros é imensa. Cada caso possui suas particularidades e uma conseqüente abordagem distinta.

A base para a aplicação de técnicas de controle está nos sistemas de monitoramento, que podem ser divididos em sistemas de supervisionamento, sistemas de diagnóstico e sistemas de controle adaptativo [15].

Sistemas de supervisionamento medem as condições da máquina, ferramenta ou peça, indicando as falhas através de um alarme, interrompendo o processo e esperando pela ação corretiva do operador. Sistemas de diagnóstico procuram achar uma relação funcional ou causal entre as falhas e suas origens. Ambos podem ser classificados como sistemas de controle de malha aberta.

Os sistemas de controle adaptativo caracterizam-se como sistemas de malha fechada e procuram adaptar automaticamente as condições de usinagem a uma estratégia programada, permitindo que os desvios de trajetórias impostos pelo sistema sejam corrigidos em processo. Esta correção interessa quando se trata da correção de todos os erros, favorecendo a obtenção de peças mais precisas do que o limite imposto pelos componentes e sistemas da máquina.

No quadro 1 é apresentado o campo de aplicação dos sistemas de monitoramento, classificado de acordo com o seu grau de dependência com relação ao tempo de resposta exigido do sistema. Este tempo de resposta é muito importante quando se deseja tomar medidas corretivas praticamente instantâneas, como no caso de colisões ou até correções de trajetórias.

O campo de aplicação destes sistemas é muito extenso, mas para a aplicação de técnicas de controle adaptativo, o mais importante é o monitoramento em processo da forma, da dimensão e da rugosidade das peças produzidas.

As demais aplicações se mostram muito interessantes e eficientes no que diz respeito à segurança e funcionamento das máquinas, mas só servem de suporte para garantir de forma indireta a qualidade da peças produzidas, sem alterar o limite de qualidade atingível pela máquina.

Segundo BYRNE ET AL [17], existe uma grande variedade de tipos de sensores e métodos de leitura das “grandezas monitoradas”. A qualidade do sistema como um todo, além do tipo de sensor utilizado, vai depender muito do tratamento do sinal emitido por este sensor e da estratégia empregada para solucionar os problemas detectados pelo sistema. Um outro ponto destacado no quadro é a velocidade de resposta do sistema que, conforme o caso, possui um grau de criticidade diferente.

| | Tempo de resposta é crítico | Tempo de resposta não é crítico |
|--------------------------------------|---|---|
| Máquina | <ul style="list-style-type: none"> • Controle CNC • Colisões | <ul style="list-style-type: none"> • Precisão • Deformação térmica |
| Ferramenta | <ul style="list-style-type: none"> • Quebra • Aproximação | <ul style="list-style-type: none"> • Desgaste • Presença |
| Processo | <ul style="list-style-type: none"> • Vibração • Força / Torque / Potência • Formação de cavaco | <ul style="list-style-type: none"> • Refrigerante |
| Condicionamento da ferramenta | <ul style="list-style-type: none"> • Dressamento | <ul style="list-style-type: none"> • Compensação de medida após medição de desgaste |
| Peça | <ul style="list-style-type: none"> • Dimensão em processo • Forma em processo • Rugosidade em processo | <ul style="list-style-type: none"> • Dimensão do cavaco • Material da peça • Integridade da superfície |

Quadro 1 - Condições monitoradas nos processos de usinagem [17].

Uma idéia do limite atual desta tecnologia de controle adaptativo é apresentada por WU E NI [18], que sugerem a utilização de técnicas de controle de previsão e compensação (FCC - “Forecasting Compensatory Control”) para fazer com que máquinas convencionais tenham seus erros determinísticos e estocásticos compensados através da utilização de avançadas técnicas de leitura “on-line”, de computadores, de modelagens estocásticas e técnicas de controle de atuadores.

Desta forma, o controle de previsão e compensação não é simplesmente um algoritmo de controle, mas um completo esquema de controle, dividido em cinco aspectos principais:

- 1 - Medições de erros em processo para monitorar todas as variações existentes;
- 2 - Processamento de sinal “On-line”, para atender com velocidade hábil às variações e atuar sobre as mesmas;
- 3 - Modelamento estocástico, para descrever adequadamente o processo dinâmico da máquina e permitir até a previsão deste processo;
- 4 - Previsão dos erros a partir de condições passadas e atuais do processo, antes que a ferramenta de corte atue no ponto de compensação, dando tempo para que os atuadores criem e executem comandos compensatórios; e
- 5 - Controle compensatório propriamente dito, com velocidade e precisão adequadas.

Um exemplo da utilização de um sistema de controle de previsão e compensação é mostrado na figura 14, onde é apresentado o esquema de montagem de uma fresadora de topo monitorada. O esquema consiste em um sistema de malha fechada assistido por laser de alinhamento com um atuador hidráulico. Desta forma, o sistema de laser pode captar as variações da trajetória do cabeçote e acionar o atuador montado no próprio cabeçote da máquina, alterando a profundidade de corte em processo e melhorando a qualidade dimensional da peça usinada.

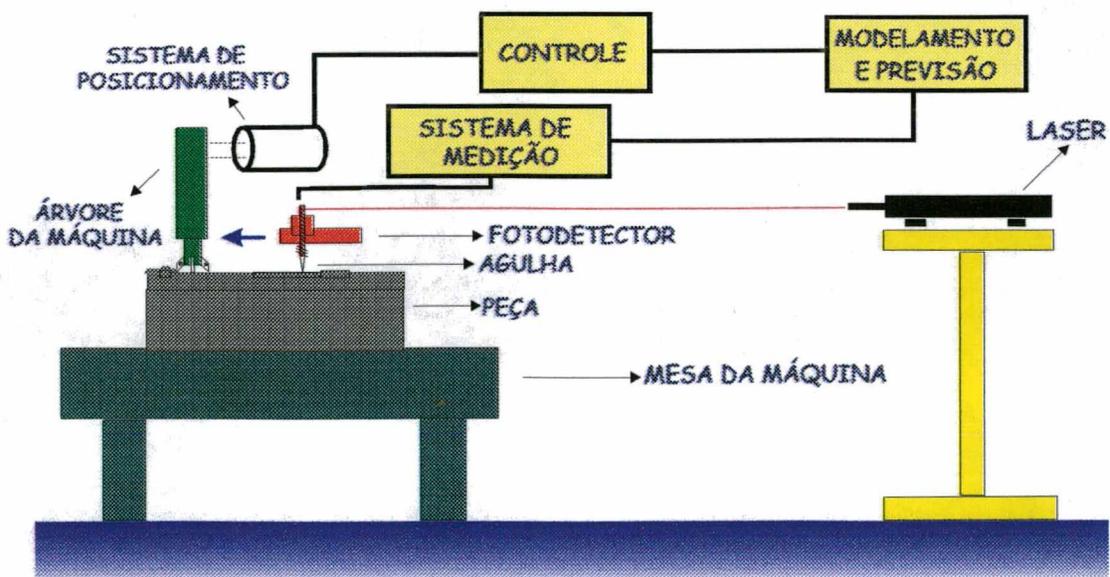


Figura 14 - Representação esquemática do sistema de controle da fresadora [18].

Na figura 15, é apresentado um gráfico que mostra a comparação das trajetórias geradas com e sem o sistema FCC. A melhoria alcançada pode chegar a 90 % do valor máximo da linearidade da peça.

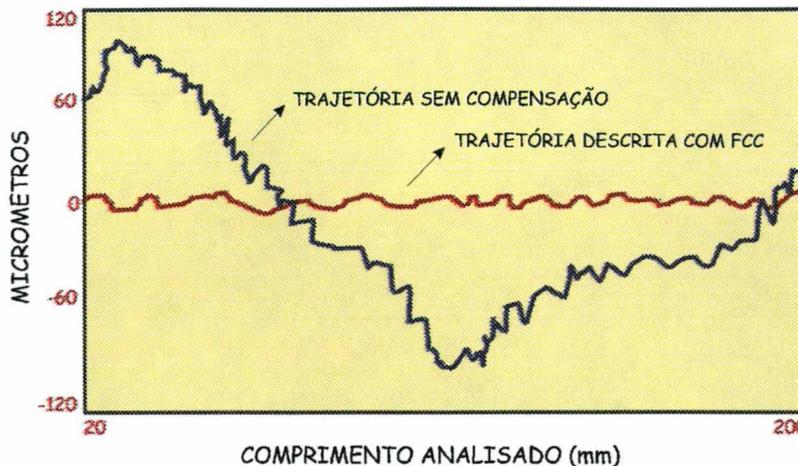


Figura 15 - Comparação da trajetória descrita no fresamento de topo utilizando a técnica FCC.

3.3. SUBSTITUIÇÃO DE MOVIMENTOS DAS MÁQUINAS

De todos os movimentos e trajetórias descritas pelos componentes das máquinas, somente os movimentos que são prejudiciais ao processo de usinagem devem ser avaliados. Assim, existem direções sensíveis e não-sensíveis para cada processo de usinagem.

Todos os movimentos relativos entre ferramenta e a peça que possuem uma componente na direção normal à superfície que se está produzindo, refletem-se no contorno da superfície produzida. Uma direção de movimento definida desta forma é chamada de “direção sensível”.

Movimentos perpendiculares à direção sensível não possuem influência sobre a peça que está sendo usinada, caracterizando direções não sensíveis.

Se, numa máquina-ferramenta, suas direções sensíveis apresentam erros maiores do que a qualidade desejada da peça a ser usinada, pode-se substituir estes movimentos por dispositivos com movimentos mais precisos.

Existem vários exemplos de dispositivos e acessórios de máquinas que objetivam este tipo de melhoramento na peças produzidas. Alguns exemplos podem ser citados.

Na figura 16 é mostrado o Romicron®, que consiste em uma ferramenta de mandrilamento com ajuste de alta precisão para a usinagem de furos. Com este equipamento, máquinas em condições normais de utilização podem usinar furos com ajuste de 1 μm no diâmetro, ou 0,5 μm no raio. A ferramenta também possibilita um balanceamento incorporado no próprio cabeçote, permitindo atingir a classe G 1.0 [19]. Esta classe se destina a equipamentos precisos, tais como acionamentos de gravadores, de retificadoras e induzidos de motores pequenos para aplicações especiais [20]. Desta forma, mesmo que a máquina não tenha condições de usinar furos com essa qualidade, a utilização deste cabeçote permitirá que isto aconteça, alterando basicamente o sistema de posicionamento da ferramenta na execução dos furos e do balanceamento do conjunto.

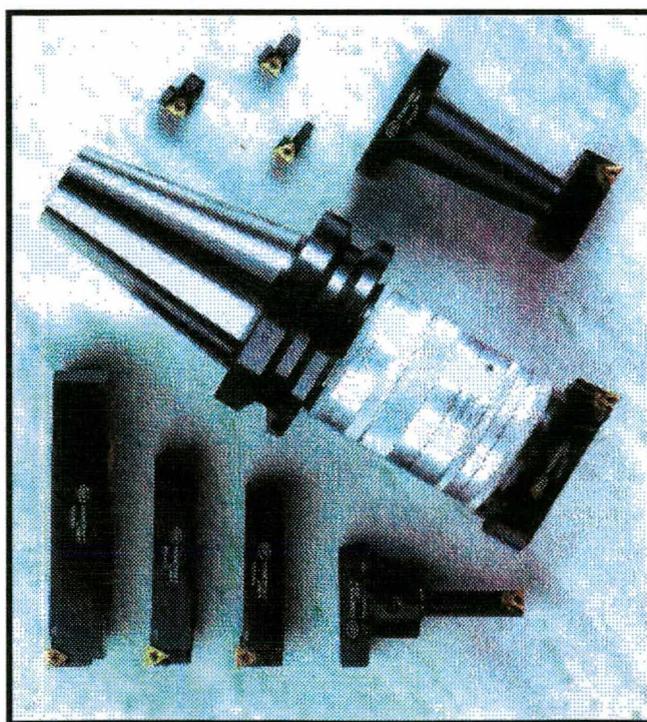


Figura 16 - Barra de mandrilamento “Romicron” [19].

Na figura 17 é mostrado um divisor horizontal controlável. Este sistema pode ser acoplado a qualquer comando CNC ou controlado por um microcomputador do tipo PC com *software* específico, com mais dois eixos lineares adicionais [21]. Este equipamento permite que interpolações circulares possam ser eliminadas da programação CNC de máquinas com os três

eixos convencionais e transferidas ao divisor, assegurando uma trajetória circular mais precisa. Além desta, diversas outras aplicações podem prever a utilização do divisor horizontal controlável, sempre com objetivo de substituir trajetórias imprecisas da máquina pela nova trajetória fornecida pelo dispositivo.

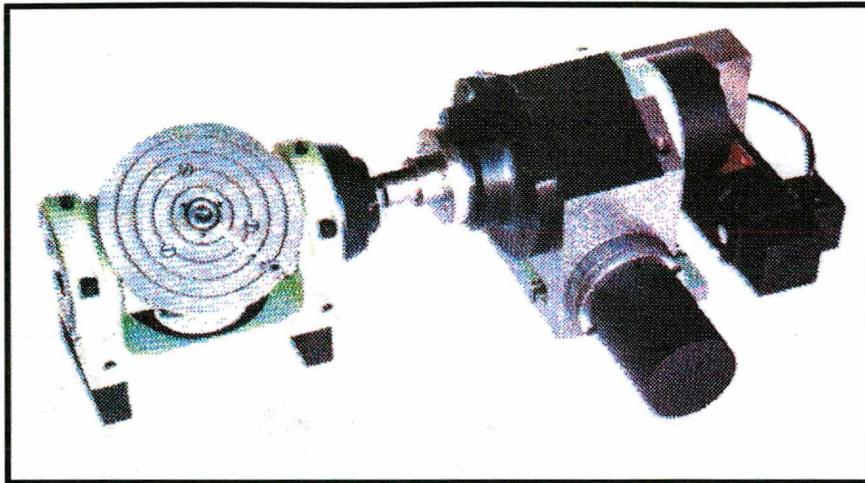


Figura 17 - Divisor horizontal controlável [21].

Na figura 18 é mostrado um cabeçote amplificador de rotação, até 50.000 rpm, acionado pela própria máquina-ferramenta.



Figura 18 - Cabeçote de alta velocidade [22].

O cabeçote amplifica a rotação da árvore da máquina até um fator máximo de 8 vezes a rotação original. Através deste cabeçote, pode-se obter altíssimas velocidades de corte no fresamento, furação e retificação, resultando em acabamentos superficiais e precisão dimensional muito maiores na peças usinadas do que os valores que seriam alcançados pela máquina sem o mesmo.

Este cabeçote é equipado com mancais de rolamento de cerâmica, o que garante uma altíssima rigidez e uma melhor precisão de giro, sem maiores problemas com dilatação térmica, devido à passagem de fluido refrigerante por dentro do cabeçote antes de atingir a região de corte da ferramenta [22].

A figura 19 mostra dois cabeçotes fresadores e retificadores planetários acionados com turbina a ar, com velocidades de rotação de 35.000 e 70.000 rpm. Os mancais são de rolamento com classe de alta precisão, refrigerados e lubrificados pelo ar que alimenta a turbina, que vem acrescido de uma névoa de óleo [23].

As altas rotações permitem altas velocidades de corte e, com isso, melhores qualidades de forma e superficial nas peças usinadas.

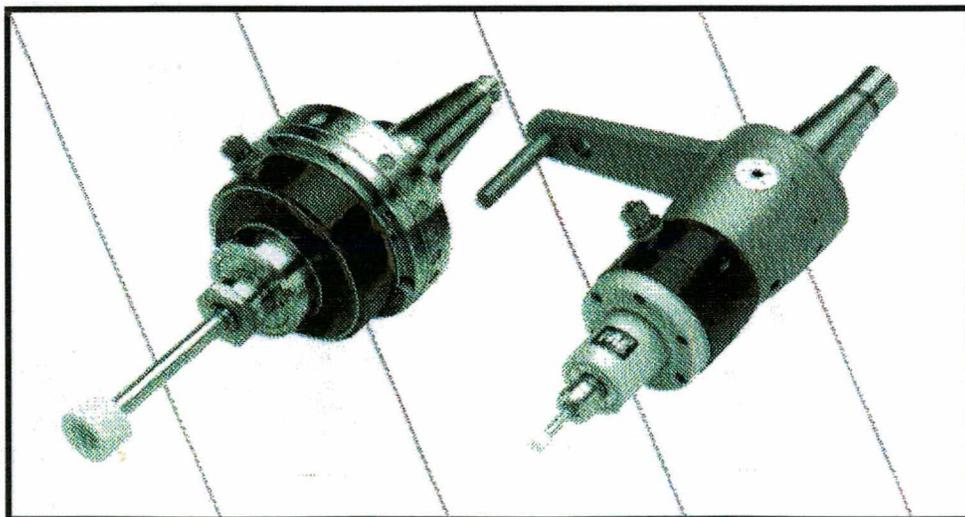


Figura 19 - Cabeçotes de alta rotação acionados a ar [23].

A figura 20 mostra alguns cabeçotes multifuso que, além de reduzirem o tempo total de usinagem dos furos de uma peça, permitem que, uma vez que a posição de cada mandril esteja

corretamente definida, os furos sejam feitos sempre seguindo este posicionamento, reduzindo muito os possíveis erros de posição entre furos.



Figura 20 - Cabeçotes multifuso [24].

Numa situação normal, uma máquina CNC teria que fazer um furo de cada vez, acumulando os erros das suas trajetórias para posicionar os próximos furos. Desta forma, uma grande cadeia de erros atuaria sobre estes furos, aumentando a dispersão dos posicionamentos relativos.

Mesmo que a peça fabricada não exija uma tolerância apertada na posição dos diversos furos, pelo menos ganha-se muito na redução do tempo gasto no processo. O tempo efetivo de usinagem de “n” furos é reduzido para um único furo, e os tempos de deslocamento da ferramenta no intervalo entre cada furo é eliminado, já que todos são feitos em um único movimento. A preocupação adicional com este sistema é quanto ao desgaste e quebra das ferramentas, exigindo um controle maior do processo.

Na figura 21 é apresentada uma morsa com ajuste angular nos três eixos.

Este sistema permite fixações das peças em diversas posições, permitindo o controle preciso dos ângulos nos três eixos, dispensando a necessidade da utilização de gabaritos ou outros dispositivos especiais.

A possibilidade de fixar peças com uma referência de posição confiável elimina vários erros provenientes de um mal ajuste inicial da peça bruta. Assim, é muito mais fácil e confiável um deslocamento angular através de um dispositivo deste tipo do que rotacionar uma mesa inteira de uma máquina para posicionamento das peças, como acontece em casos especiais, onde sempre se procura adaptar dispositivos inadequados.



Figura 21 - Morsa com ajuste angular nos três eixos [25].

Como pode ser observado, cada dispositivo citado, assim como muitos outros, se aplica a uma função ou operação específica em uma máquina-ferramenta. Isso quer dizer que não há um grande ganho de flexibilidade na máquina, mas sim uma melhora significativa com relação a determinadas operações realizadas com auxílio destes dispositivos.

Se existe a necessidade de alta qualidade nos componentes produzidos e estes exigem a utilização de vários dispositivos diferentes, muitas vezes é mais recomendável a aquisição de uma máquina-ferramenta específica que satisfaça estas necessidades produtivas no lugar de ter-se diversos dispositivos “cercando” a falta de qualidade da máquina utilizada. Isto ocorre devido à queda na disponibilidade da máquina, que está relacionada à confiabilidade de cada componente

ou sistema diretamente ligado ao processo, e à necessidade de manutenção de cada um destes sistemas.

Em resumo, dispositivos especiais são ótimos meios de atingir uma melhora na qualidade dos componentes usinados mas, dependendo da complexidade do caso, é melhor partir para a aquisição de uma máquina-ferramenta com as características desejadas.

3.4. FABRICAÇÃO DE SAPATAS PLANAS CIRCULARES

Seguindo a filosofia de utilizar as máquinas convencionais para obter componentes de maior precisão, é importante o desenvolvimento de um dispositivo para a usinagem de sapatas planas circulares para mancais aerostáticos, já que a utilização de técnicas de controle exige conhecimentos muito específicos e altos investimentos.

Atualmente, estas sapatas são torneadas e posteriormente lapidadas para melhorar a qualidade de forma da superfície e reduzir a rugosidade. Um dos problemas desta seqüência é a impossibilidade de produzir uma conicidade controlada na sapata, objetivando a otimização das características de rigidez e capacidade de carga quando em operação. Desta forma, deve-se procurar tanto o processo quanto sua cinemática otimizados para a produção das sapatas planas.

O primeiro passo é a escolha do tipo de movimento a ser utilizado para a geração da superfície plana. Uma superfície plana pode ser obtida de três formas:

- pela sobreposição de dois movimentos lineares não coincidentes, como em guias cruzadas XY de uma máquina-ferramenta;
- pela sobreposição de dois movimentos rotativos não coincidentes, como em cabeçotes de leitura de disco rígidos de microcomputadores; e
- pela sobreposição de um movimento linear e outro rotativo, como no faceamento de uma peça utilizando o processo de torneamento.

Os movimentos básicos empregados são os movimentos lineares e os rotativos.

Os erros do movimento linear são divididos em translacionais (δ_x , δ_y e δ_z), que estão associados aos desvios de movimento através dos eixos do sistema de coordenadas de referência, e rotacionais (ϵ_x , ϵ_y e ϵ_z), que estão associados aos desvios de movimento em torno dos eixos do sistema de coordenadas de referência [12].

A figura 22 representa estes erros em um carro de uma guia linear prismática simples, com um grau de liberdade.

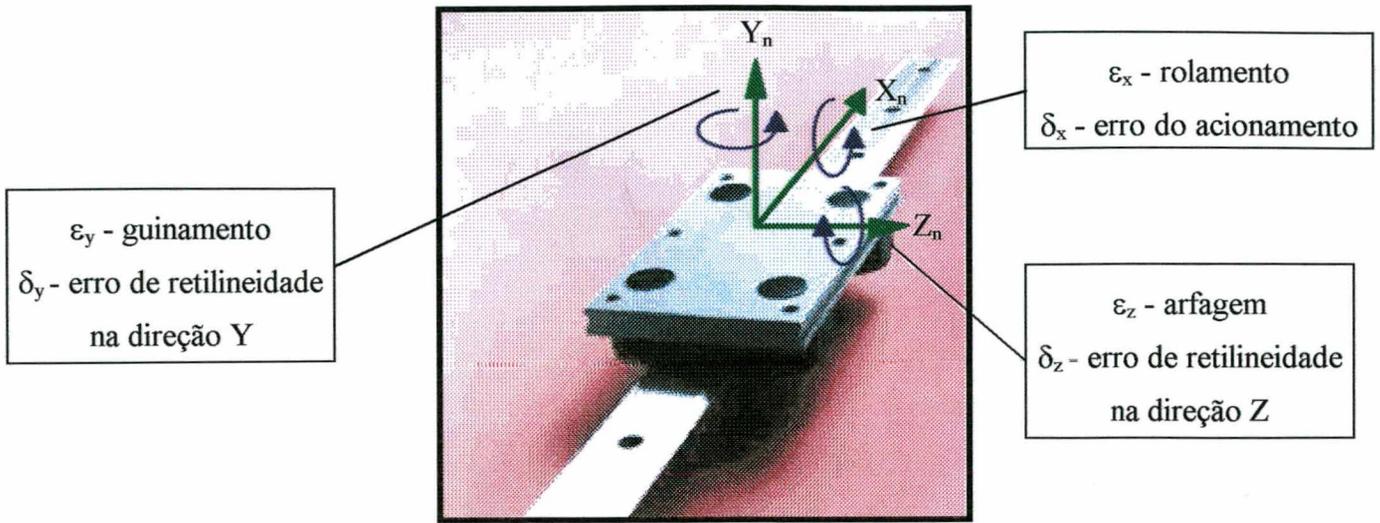


Figura 22 - Erros em um carro de uma guia linear prismática simples.

No movimento rotativo, como mostra a figura 23, o eixo de rotação do corpo gira em torno de um eixo de referência com uma posição relativa δ_x, δ_y , que é função da rotação θ_z que o corpo sofre. Um deslocamento vertical δ_z pode ou não ser função de θ_z e dos erros de inclinação ϵ_x e ϵ_y que são função do ângulo θ_z [12]. Assim, o erro no movimento rotativo consiste no fato de que o eixo de rotação do corpo orbita em torno de um eixo de rotação ideal.

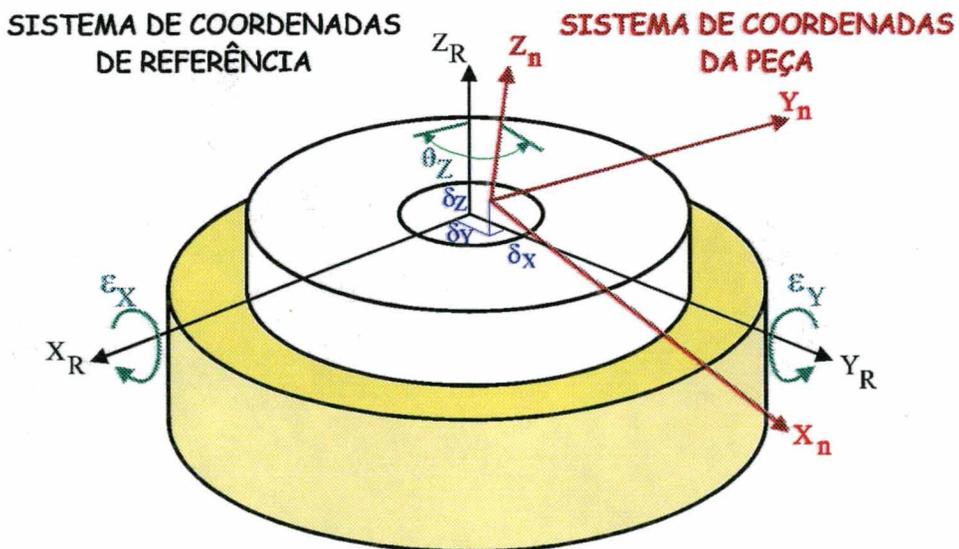


Figura 23 - Movimentos e erros em torno do um eixo de rotação do corpo com relação a um eixo de rotação ideal.

Em ambos os tipos de movimento, quanto maior é o seu curso, mais difícil fica de se garantir baixas amplitudes de erro nos limites dos deslocamentos. Sendo assim, se uma guia de comprimento “ l ” tiver seu curso duplicado para “ $2l$ ”, será muito mais difícil de garantir na fabricação um mesmo limite de erro de retilineidade. Da mesma forma, um mancal rotativo com diâmetro “ D ” que seja produzido com uma nova dimensão “ $2D$ ”, apresentará erros de batimento axial na periferia do mancal muito mais significativos.

Se for feita uma análise de cada combinação de movimentos necessários para gerar um plano, como mostra a figura 24, pode-se determinar qual é a mais adequada para a fabricação das sapatas planas circulares para os mancais aerostáticos.

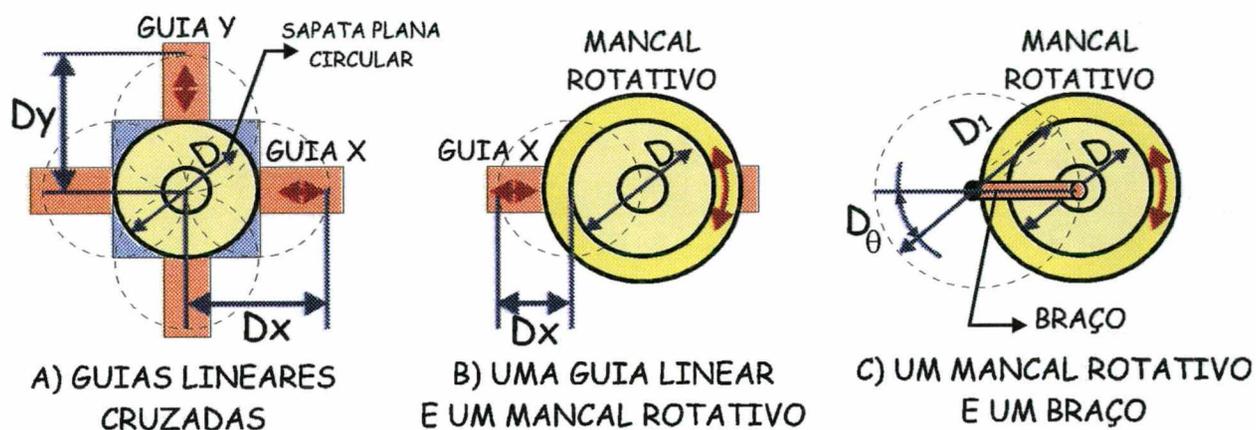


Figura 24 - Combinações de movimentos necessários para gerar um plano.

Na utilização de duas guias lineares cruzadas (figura 24-A), é necessário um deslocamento D_x e D_y em cada eixo respectivo, igual a pelo menos o diâmetro da sapata (D) circular para que toda a sua área seja coberta pela ferramenta de corte.

Na utilização de uma guia linear e um mancal rotativo (figura 24-B), o mancal rotativo deve fornecer uma revolução completa e a guia linear deve ter um curso D_x de pelo menos $D/2$, que é a metade do curso exigido para cada uma das guias cruzadas.

No caso da combinação de um mancal rotativo mais um braço pivotado (figura 24-C), o mancal rotativo também tem que fornecer uma revolução completa, mas o braço pivotado só precisa descrever um arco com deslocamento angular D_θ , que depende do comprimento do braço adotado. Normalmente, o comprimento ($D_1/2$) deste braço é maior do que o raio ($D/2$) da peça usinada.

A utilização do sistema com braço pivotado possui uma limitação grande com relação à

rigidez do braço adotado. Para situações onde há um carregamento significativo sobre a extremidade do braço, como na utilização de uma ferramenta de corte, sua aplicação não é recomendável. Isto ocorre devido às deflexões encontradas nesta extremidade durante o processo de usinagem, refletindo-se diretamente sobre a qualidade superficial da peça usinada.

Um outro fator importante a ser considerado é a maior facilidade que existe de se encontrar ou produzir mancais rotativos com baixos erros na sua trajetória, comparados às guias lineares. Somando isso ao menor curso exigido na guia combinada ao mancal rotativo, comparado às guias cruzadas, justifica-se a utilização do sistema guia linear combinada a um mancal rotativo para a fabricação das sapatas planas circulares.

Apesar de serem chamadas de sapatas planas, sabe-se que uma “leve” conicidade imposta às mesmas, como visto na figura 13, incrementa as características operacionais de rigidez e capacidade de carga do mancal aerostático.

Para se obter esta conicidade, é necessário que a máquina-ferramenta empregada utilize, além da rotação da peça, dois movimentos de avanço controlados, um na direção radial e outro na direção axial da peça, como mostra a figura 25. Além da possibilidade de realizar estes movimentos, os mesmos devem possuir trajetórias coerentes com a qualidade de forma pretendida para as sapatas planas circulares.

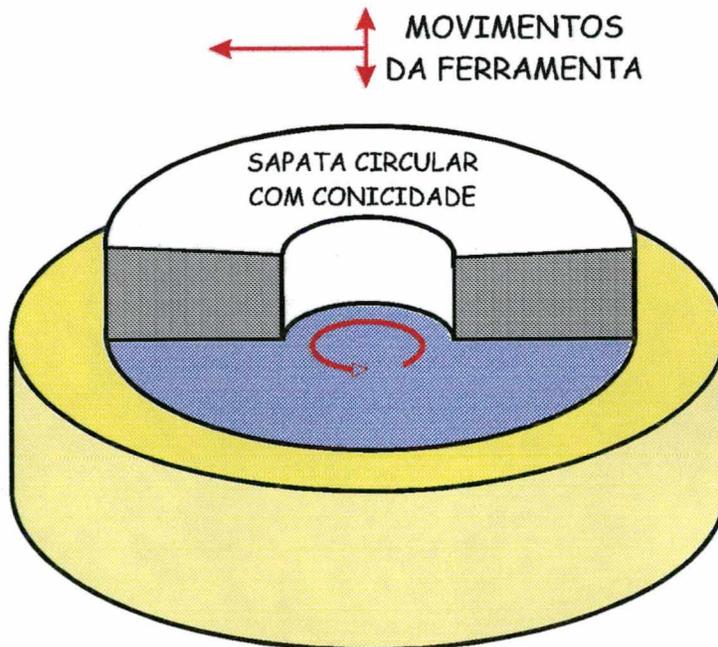


Figura 25 - Movimentos necessários à ferramenta para a fabricação de sapatas planas circulares com conicidade controlada.

Quanto aos processos de fabricação, pode-se utilizar tanto o torneamento quanto a retificação para produzir as sapatas. No torneamento, geralmente a ferramenta fica parada e o movimento principal de corte é dado pela peça. Na retificação, o rebolo possui o movimento principal de corte e a peça descreve as trajetórias de acordo com a forma pretendida.

Optou-se por desenvolver um dispositivo baseado em uma retificadora, devido a estas já possuírem um cabeçote acionado onde é montado o rebolo. Geralmente, estes cabeçotes são fabricados com uma alta exigência de qualidade, pela necessidade das elevadas velocidades de corte envolvidas no processo de retificação. No torneamento, a ferramenta fica estacionária e o movimento principal de corte deve partir da peça, o que aumenta a complexidade de um dispositivo pela necessidade do mesmo possuir acionamento.

3.5. CINEMÁTICA ENVOLVIDA NA FABRICAÇÃO DAS SAPATAS

Na figura 26 é apresentado o esquema de uma sapata plana circular e as suas exigências de qualidade de forma e superficial de acordo com informações fornecidas pela literatura [11,12].

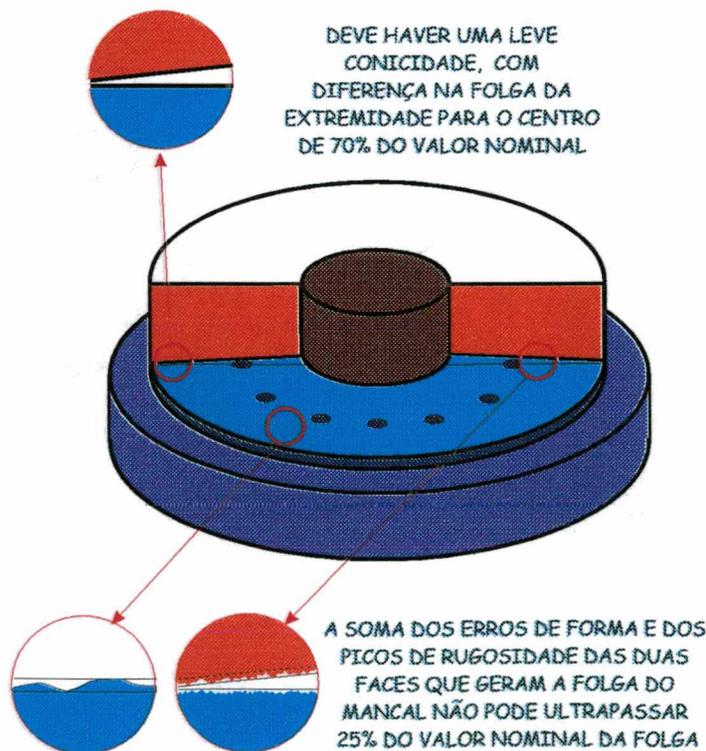


Figura 26- Exigências de qualidade de forma e superficial para uma sapata plana circular aerostática com folga otimizada [11, 12].

Através destas especificações é possível determinar que movimentos são sensíveis na fabricação das sapatas circulares. Como o processo base para a usinagem das sapatas é a retificação, o dispositivo em desenvolvimento se chamará “mesa de retificação”.

Segundo König [26], a cinemática envolvida em processos específicos de retificação são estas mostradas na figura 27, que também apresenta seus parâmetros variáveis de entrada, padronizados pela norma DIN 8589 [27].

Com base na figura 27, o processo de retificação que melhor se adapta à necessidade de movimentos para a fabricação de sapatas circulares, é a retificação circunferencial longitudinal rotativa. Os seus parâmetros variáveis de entrada são a velocidade de corte (v_s), a velocidade de deslocamento da peça (v_w), a velocidade de avanço do rebolo (v_f), a largura do rebolo (b_s) e os passos de incremento de avanço de corte radial (a_p) e axial (a_e).

Como se pretende gerar uma conicidade na sapata circular, o movimento de avanço do rebolo, caracterizado pela velocidade v_b , deverá possuir duas componentes de direção, uma radial e outra axial, sem descaracterizar a cinemática apresentada pelo processo genérico.

| | EXTERNA CILÍNDRICA | INTERNA CILÍNDRICA | PLANA | ROTATIVA |
|--|-----------------------|-----------------------|-------|----------|
| CIRCUNFERENCIAL DE MERGULHO (PENETRAÇÃO) | | | | |
| CIRCUNFERENCIAL LONGITUDINAL | | | | |
| LATERAL DE MERGULHO | | | | |
| LATERAL LONGITUDINAL | | | | |

Figura 27 - Representação dos parâmetros variáveis de entrada para os principais processos de retificação (DIN 8589 [27]).

Determinada a configuração geral da mesa de retificação, deve-se partir para uma análise sobre que tipos de componentes e sistemas devem ser utilizados para se compor esta mesa e garantir a qualidade necessária nas trajetórias geradas.

Para isso, será utilizada uma seqüência de projeto envolvendo a criação de uma estrutura de funções referente à mesa e matrizes de comparação dos componentes principais da mesa, finalizando em uma concepção “ideal” para a mesa de retificação.

3.6. ESTRUTURA DE FUNÇÕES DA MESA DE RETIFICAÇÃO

A estrutura de funções é um método que permite a determinação e visualização das diversas funções do sistema como um todo, de modo que a análise de todas as suas partes permita um estudo mais adequado para a escolha do arranjo a ser implementado no sistema.

A construção de uma estrutura de funções para um sistema parte sempre da chamada “função total”, que descreve qual o objetivo básico a ser alcançado por este sistema. No caso da mesa de retificação, sua função total é mostrada na figura 28.



Figura 28 - Função total da mesa de retificação

A partir da cinemática básica do processo, a retificação circunferencial longitudinal rotativa, e das exigências de forma para as sapatas, tem-se idéia dos requisitos básicos necessários para a mesa de retificação. Desta forma, se a função total do sistema for desdobrada em vários níveis, resulta em uma estrutura de funções detalhada do sistema que indica cada elemento necessário ao correto funcionamento do mesmo.

O primeiro desdobramento da função total do sistema resulta na estrutura apresentada na figura 29, que mostra três subsistemas distintos:

- *subsistema ferramenta*: consiste na própria máquina-ferramenta (retificadora plana);
- *subsistema peça*: engloba a peça usinada, a mesa de retificação e os sistemas de suporte; e
- *subsistema meio*: engloba o controle do ambiente de usinagem.

Os desdobramentos subseqüentes são responsáveis pelo detalhamento cada vez maior, podendo ter um limite final na descrição de cada componente utilizado no dispositivo. O limite final escolhido na estrutura da mesa de retificação é este mostrado na figura 30. Preferiu-se trabalhar com uma estrutura mais aberta para não precipitar a escolha da solução final.

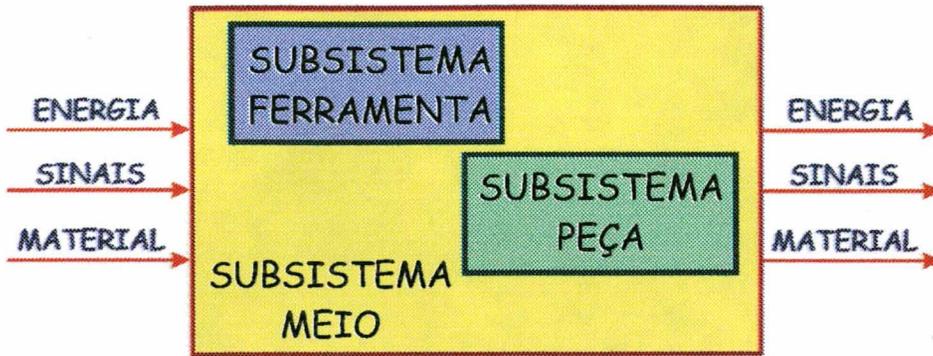


Figura 29 - Primeiro desdobramento da função total da mesa de retificação.

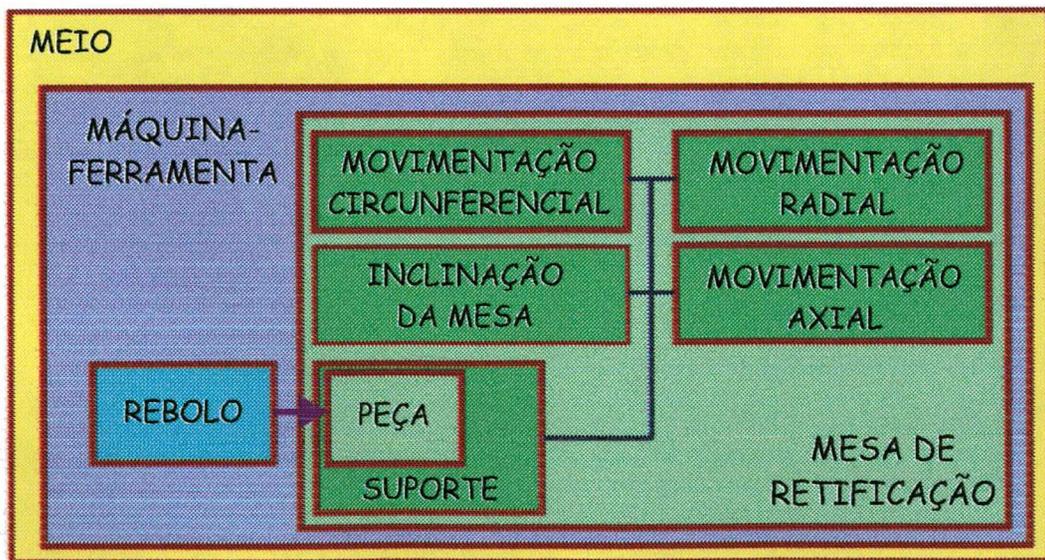


Figura 30 - Desdobramento final das funções da mesa de retificação.

Para que seja possível definir que tipo de componente suprirá cada necessidade específica de cada uma das funções envolvidas, serão montadas matrizes de comparação dos componentes com uma análise detalhada das suas potencialidades, permitindo que se possa decidir sobre qual componente atende melhor às especificações envolvidas na mesa de retificação.

CAPÍTULO 4

GERAÇÃO E SELEÇÃO DE SOLUÇÕES PARA A MESA DE RETIFICAÇÃO

Um homem sério tem poucas idéias. Um homem de idéias nunca é sério.

Paul Valery (1871-1945).

4.1. INTRODUÇÃO

A construção das matrizes de comparação se baseia no método da matriz morfológica, com pequenas diferenças na sua estrutura.

Segundo BACK [6], o método das matrizes morfológicas consiste numa pesquisa sistemática de diferentes combinações de elementos ou parâmetros, com objetivo de encontrar soluções para o problema estudado. A aplicação do método inicia a partir da seqüência de funções do processo, quando se relacionam todos os princípios de solução alternativos para cada função, de forma independente, sem se preocupar com as demais funções. Estas soluções podem surgir de diversas formas, seja por revisão na literatura, por analogia entre sistemas, por “*brainstorming*” ou por outras fontes. A seguir, parte-se para a geração de soluções ou concepções alternativas para o problema global formulado, observando a relação e compatibilidade entre as soluções apresentadas para cada função.

O próximo passo consiste na avaliação e seleção das concepções apresentadas. De imediato, muitas combinações podem ser eliminadas por serem incompatíveis ou inviáveis. Para as soluções consideradas possíveis, deve ser feita uma análise mais criteriosa com base nos requisitos de qualidade propostos ao projeto. Uma vez selecionada a melhor solução, esta é trabalhada de modo a obter-se uma melhor descrição e um arranjo final da concepção, garantindo um perfeito funcionamento e o correto atendimento das necessidades impostas pelas funções do sistema.

Para as matrizes de comparação, o procedimento será o mesmo, mas a comparação entre os princípios de solução para cada função será feita de forma independente, com base nos

requisitos de qualidade impostos ao projeto.

A partir da estrutura de funções proposta no item 3.6, serão apresentados os diversos princípios de solução para cada uma das funções apresentadas, concluindo o estudo com a apresentação da solução considerada ideal para a mesa de retificação.

4.2. GRANDEZAS DO PROCESSO REFERENTES ÀS FUNÇÕES DA MESA

Como visto no final do capítulo 3, algumas funções da mesa de retificação possuem relação direta com os movimentos necessários ao processo de retificação circunferencial longitudinal rotativa. Na figura 31 são apresentados estes movimentos. As demais funções a serem cumpridas pela mesa de retificação referem-se ao sistema de fixação da peça de trabalho com a mesa de retificação e o controle do ambiente de usinagem.

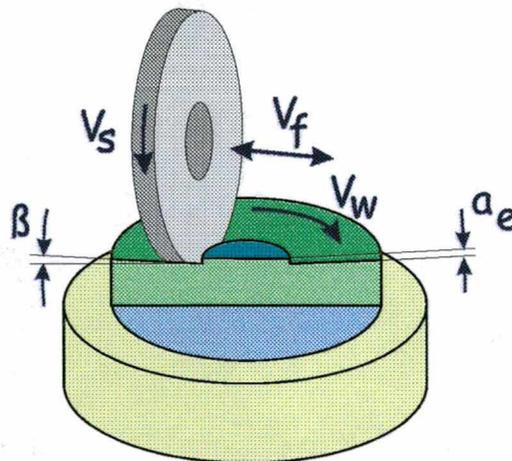


Figura 31 - Movimentos principais da mesa de retificação.

No quadro 2 são descritas as grandezas de processo apresentadas na figura 31, com seus significados com relação à função que desempenham na mesa de retificação.

Após explicitadas as funções a serem desempenhadas pela mesa de retificação, parte-se para a confecção das matrizes morfológicas de cada uma das funções, apresentando as principais soluções para as mesmas.

A velocidade de rotação do rebole (v_s) é dada pela máquina-ferramenta. Os demais movimentos do processo serão fornecidos pela mesa de retificação.

| Grandeza | Significado | Função equivalente |
|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| v_s | velocidade periférica do rebolo | velocidade de corte do processo |
| v_w | velocidade circunferencial da peça | movimentação circunferencial da mesa |
| v_f | velocidade de avanço radial | movimentação radial da mesa |
| a_c | avanço axial / profundidade de corte | movimentação axial da mesa |
| β | conicidade da peça | inclinação da mesa |

Quadro 2 - Grandezas referentes às funções.

4.3. FUNÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO CIRCUNFERENCIAL DA MESA

Esta função deve ser desempenhada por mancais rotativos. Mancais rotativos são elementos fixos que permitem que haja somente um grau de liberdade no movimento de um eixo. Este movimento deve ser puramente de rotação, com máxima restrição a possíveis movimentos de translação.

Uma classificação genérica de mancais rotativos considera o tipo de carregamento transmitido e/ou absorvido pelo mancal. Estes carregamentos podem ser axiais, radiais ou axiais e radiais ao mesmo tempo. Cada aplicação exige um tipo de mancal para suportar a essas solicitações. Cada tipo de mancal rotativo apresenta várias configurações de acordo com o tipo de carregamento imposto ao mesmo.

A classificação mais usual adotada para os mancais rotativos de acordo com o seu princípio de funcionamento é esta mostrada na figura 32. Nela são apresentados todos os tipos de mancais rotativos empregados em sistemas mecânicos e, por possuírem uma grande importância nos projetos de sistemas mecânicos, serão abordados com mais detalhes no decorrer do capítulo.

Após apresentados individualmente, os mancais serão comparados entre si na montagem da matriz de comparação. Esta comparação tem referência nas características operacionais mais importantes para o perfeito funcionamento da mesa de retificação.

A comparação será feita de forma qualitativa e genérica, sendo apresentadas as principais potencialidades e limitações dos mancais, sem se preocupar com valores absolutos e exatos.

Nesta comparação, pode-se decidir sobre qual o tipo de mancal mais indicado para este projeto da mesa de retificação.

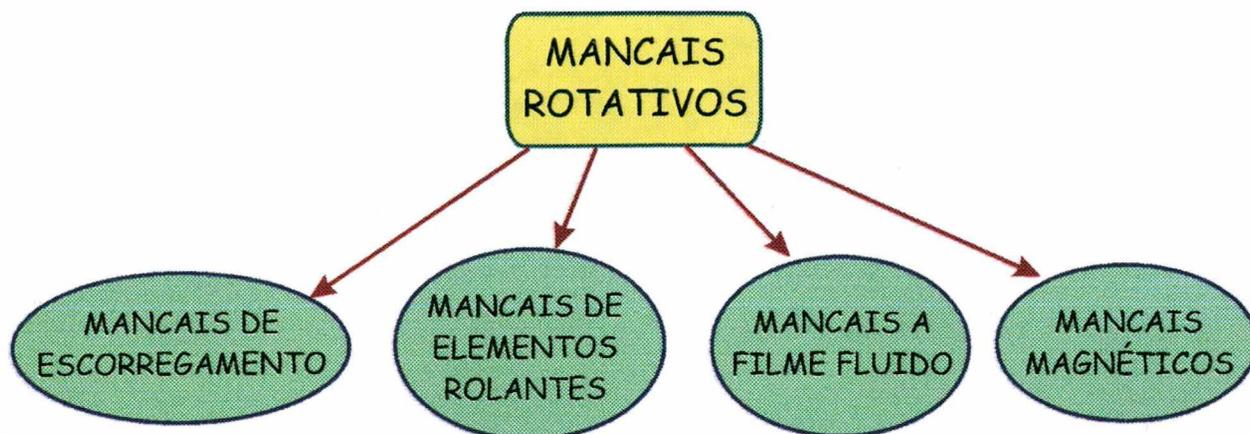


Figura 32 - Classificação de mancais rotativos quanto ao princípio de funcionamento [5,30].

4.3.1. MANCAIS DE ESCORREGAMENTO

Os mancais de escorregamento foram os primeiros tipos de mancais a serem utilizados pelo homem [30]. Nestes, as superfícies com movimento relativo estão em contato direto, podendo ou não ter lubrificação.

A classificação desse tipo de mancal se baseia na forma de contato entre as superfícies em deslizamento. Desta forma, os mancais podem ser de escorregamento radial, axial, cônico ou esférico.

Os mancais de escorregamento se caracterizam por apresentarem um elevado atrito entre seus componentes com movimento relativo, o que é totalmente indesejável em aplicações com velocidades relativas mais altas, devido a problemas de desgaste, geração elevada de calor e possível colapso do mancal com o seu engripamento.

Mesmo atuando em baixas velocidades de rotação os mancais de escorregamento são instáveis, por apresentarem um coeficiente de atrito estático bem maior do que o coeficiente de atrito dinâmico. Desta forma, sua aplicação em sistemas mais precisos se resume a situações onde não haja movimento relativo entre as partes durante a operação do sistema, e sim um posicionamento de um componente que permanecerá imóvel no processo.

Um exemplo de aplicação é mostrado na figura 33, onde aparece uma morsa hidráulica montada sobre dois mancais de escorregamento.

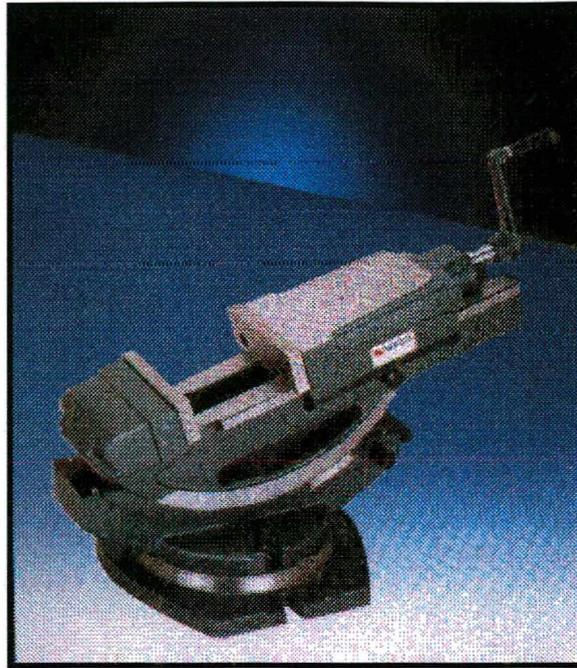


Figura 33 - Exemplo de aplicação de mancais de escorregamento [25].

No caso da figura 33, os mancais são responsáveis pelo posicionamento da morsa com relação a dois eixos de rotação. Uma vez posicionada a morsa, esta posição não se altera durante a operação da máquina-ferramenta. Caso seja necessário um ajuste, este é feito com a máquina parada.

Este tipo de ajuste não possui uma frequência muito grande, fazendo com que o seu desgaste não seja crítico, justificando a utilização de mancais de escorregamento, que possuem um baixo custo com relação aos demais tipos de mancais.

4.3.2. MANCAIS DE ELEMENTOS ROLANTES

Os mancais de elementos rolantes são os mancais mais utilizados em sistemas mecânicos, tanto pela simplicidade de cálculo e seleção, quanto pelo nível de padronização encontrado no mercado e a variedade de formas para as diversas aplicações. Além disso, a alta produção destes componentes torna o seu custo acessível [5].

Na figura 34 são apresentados alguns exemplos deste tipo de mancal.



Figura 34 - Mancais de elementos rolantes [28].

Neste tipo de mancal, as superfícies com movimento relativo são separadas por um elemento rolante, que pode ser esférico, cilíndrico, cônico, na forma de barril ou agulha. Uma classificação mais precisa dos mancais de elementos rolantes é mostrada na figura 35. Nesta classificação, é considerada a classificação básica de mancais rotativos referente à direção do carregamento imposto ao mancal, e também mostra os tipos de elementos rolantes [28].

No seu princípio de funcionamento, os carregamentos são absorvidos pela deformação elástica no contato dos elementos rolantes com os anéis. Em consequência disto, o campo de utilização dos mancais de elementos rolantes é limitado tanto pela rigidez atingida com este mancal como pelo baixo amortecimento, que diminuem a sua precisão de giro no deslocamento.

O comportamento estático de mancais de rolamento livres de folgas e geometricamente precisos é determinado principalmente por três fatores [29]:

- número de elementos rolantes;
- diâmetro dos elementos rolantes; e
- espaçamento entre os elementos rolantes.

Quanto maior é o número de elementos e menores forem seu diâmetro e o seu espaçamento, menor será a distorção estática dos mancais. Como a produção de elementos rolantes com grande espaçamento e adequada precisão de forma causa problemas tecnológicos de fabricação, é bastante comum produzir mancais com mais de uma carreira, o que normalmente reduz a distorção estática em 40% e aumenta consideravelmente a rigidez estática do mancal [29].

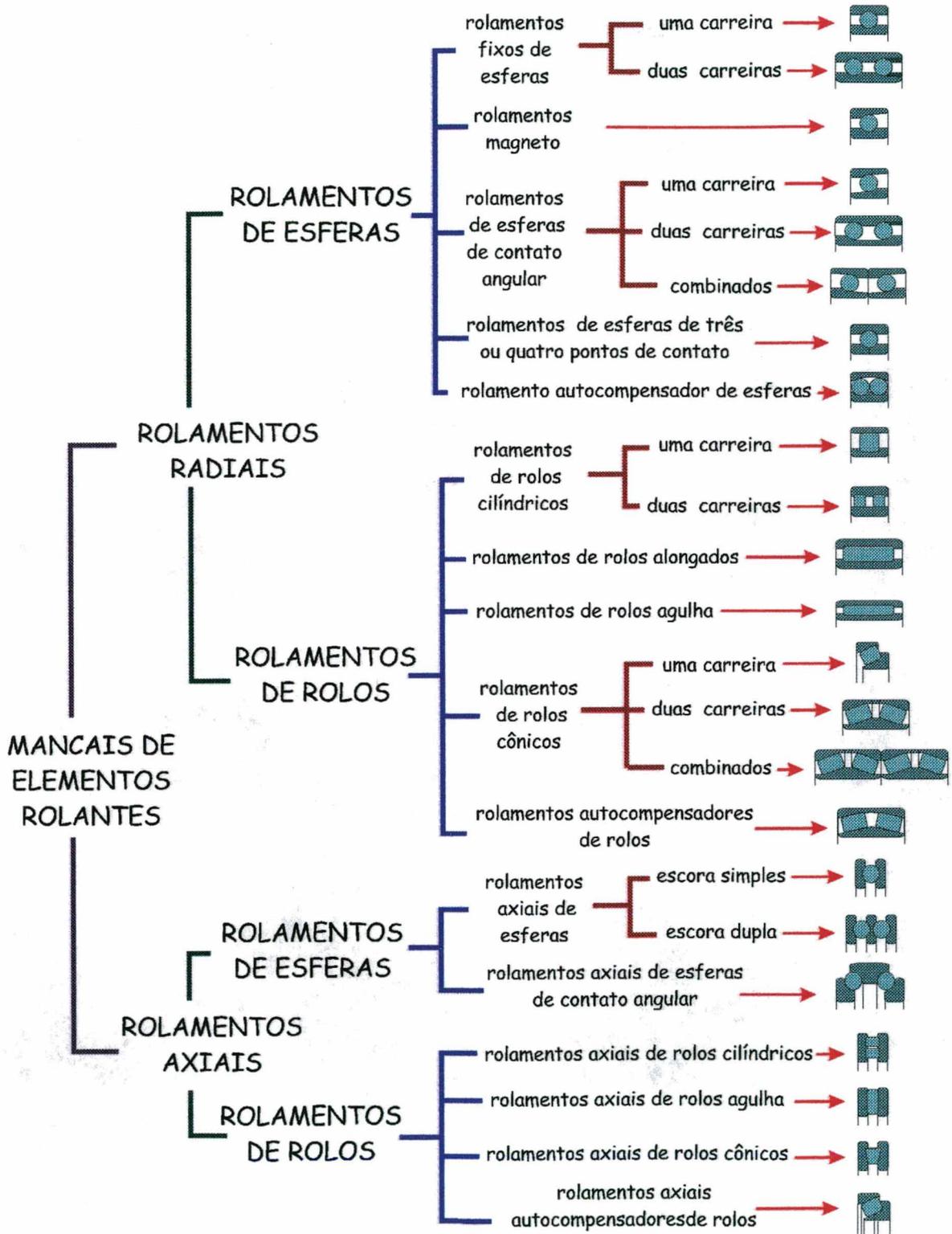


Figura 35 - Classificação dos mancais de elementos rolantes [28].

A característica geométrica do mancal de rolamento é um critério determinante na precisão do sistema mecânico projetado. Devido às imperfeições nas pistas de rolamento e nos elementos rolantes, o eixo geométrico dos mancais de rolamento não é o mesmo eixo de rotação, mas sim gera uma órbita em torno deste. Desta forma, os mancais são fabricados de acordo com classes de precisão dos seus elementos, na busca pela redução destes erros.

Além disso, mesmo se considerarmos um mancal cujos elementos possuem dimensões e forma otimizadas, será estimulada uma vibração durante o seu funcionamento, proveniente do próprio princípio de funcionamento, como mostra a figura 36.

AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO

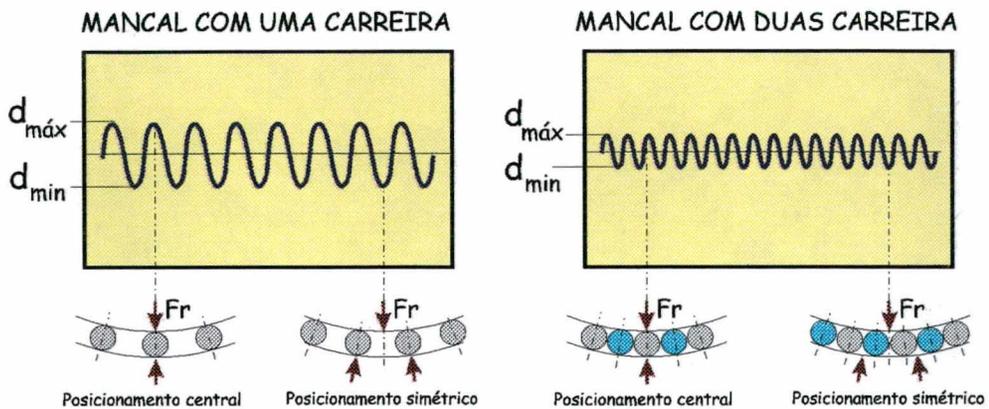


Figura 36 - Característica vibratória dos mancais de rolamento [29].

Como pode ser visto na figura 36, esta vibração pode ser bastante reduzida com a aplicação de mancais com duas carreiras defasadas entre si, reduzindo o intervalo entre a ação de cada elemento rolante. Mesmo otimizando esta disposição dos elementos rolantes, sempre vai existir este deslocamento do centro de rotação do mancal.

Com objetivo de melhorar a rigidez estática dos mancais, costuma-se montá-los com um pré-carregamento, mas isto acarretas em alguns problemas adicionais, como o aumento do atrito de rolamento, aumento da temperatura do mancal em funcionamento e a redução da vida dos mesmos pela condição mais propícia à fadiga dos componentes do mancal.

Existem diversas recomendações adicionais referentes ao projeto de assentos de mancais de rolamento, sua montagem e manutenção. A idéia básica consiste em permitir que o mancal opere sem sobrecarga devido a uma instalação incorreta e que seja facilmente substituído sem que seja danificado quando for feita a manutenção.

4.3.3. MANCAIS MAGNÉTICOS

Mancais magnéticos operam sem contato mecânico entre seus componentes com movimento relativo, o rotor e o estator. Seu princípio de funcionamento se baseia em forças de campo magnético que, controladas em malha fechada, fazem levitar o rotor no centro do estator.

Estes mancais permitem operação em altas velocidades de rotação, uma vez que não apresentam perdas por atrito. Devido à grande folga entre as partes, comparada com os mancais a filme fluido, os mancais magnéticos podem ser utilizados em máquinas para usinagem em altíssimas velocidades de corte [30].

A figura 37 mostra um protótipo de mancal magnético.

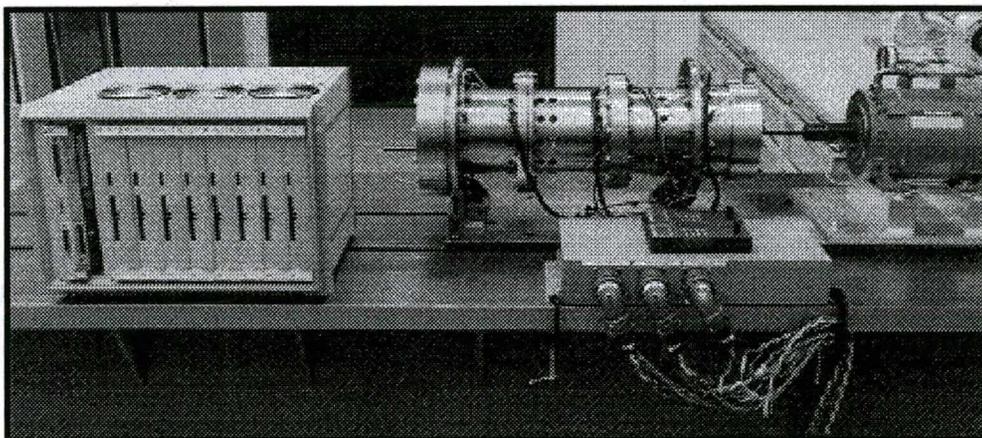


Figura 37 - Mancal magnético.

Os mancais magnéticos são constituídos de dois componentes básicos, o mancal propriamente dito e o sistema de controle. Na operação do mancal, sensores de posição medem e monitoram a distância entre o rotor e o estator. Quando é detectada uma variação nesta distância, o sistema de controle gera um sinal correspondente a esta variação, que alterará as forças eletromagnéticas sobre o rotor de modo a colocá-lo novamente na posição de equilíbrio no centro do mancal. Este monitoramento acontece tanto radial quanto axialmente.

Na figura 38 é apresentado um esquema em corte mostrando os principais componentes do mancal magnético.

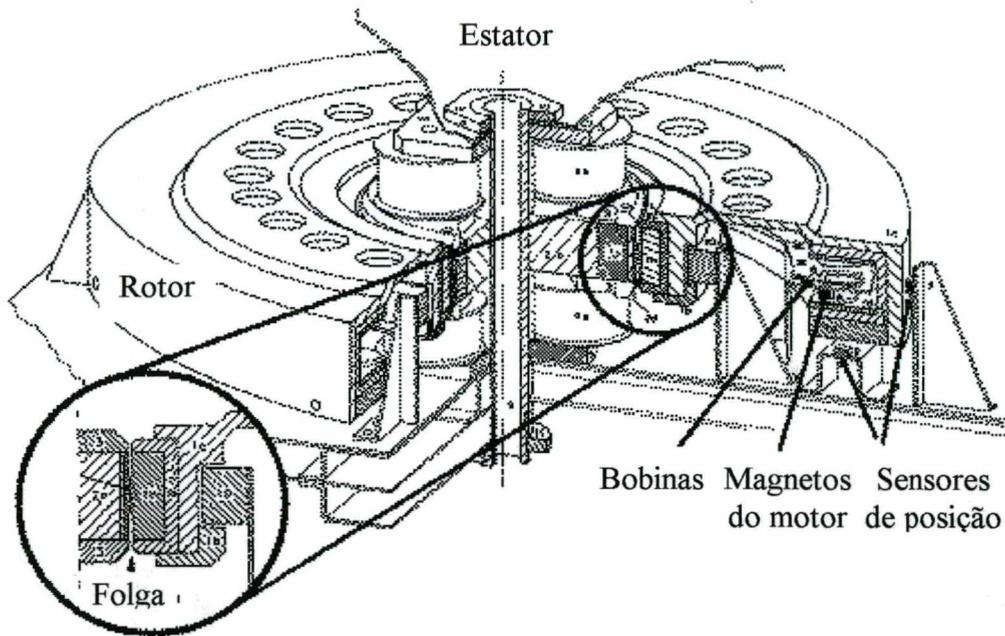


Figura 38 - Esquema de um mancal magnético.

Para proteger os mancais magnéticos de sobrecargas ou falhas no sistema de controle, estes são equipados com mancais de rolamento auxiliares. Estes mancais de rolamento são montados com aproximadamente metade da folga usual do mancal magnético. Desta forma, a condição de não haver contato mecânico entre os elementos móveis é mantida. Caso ocorra algum problema, antes de colocar todo o sistema mecânico do mancal em colapso, o rotor se apoia nos mancais de rolamento, que permitem que este continue girando até que seja parado.

As características dinâmicas dos mancais magnéticos são muito diferentes das encontradas em mancais puramente mecânicos. A rigidez e o amortecimento podem ser ajustados através do sistema de controle. Este ajuste vai depender da qualidade do sistema de controle [30].

4.3.4. MANCAIS A FILME FLUIDO

Mancais a filme fluido têm seu princípio de funcionamento baseado no fato de que as superfícies que possuem movimento relativo ficam separadas por um filme de fluido, que pode ser líquido ou gasoso. Este filme não permite contato mecânico entre as superfícies.

Como foi descrito no item 2.7 sobre modelamento matemático de mancais a filme fluido,

existem três fontes geradoras da sustentação destes tipos de mancais:

- efeito de cunha;
- efeito de filme espremido; e
- alimentação externa de pressão do fluido.

A classificação dos mancais a filme fluido leva em consideração o principal efeito de sustentação que atua sobre o mesmo, conforme a figura 39. Além disto, também é considerado o tipo de fluido utilizado.

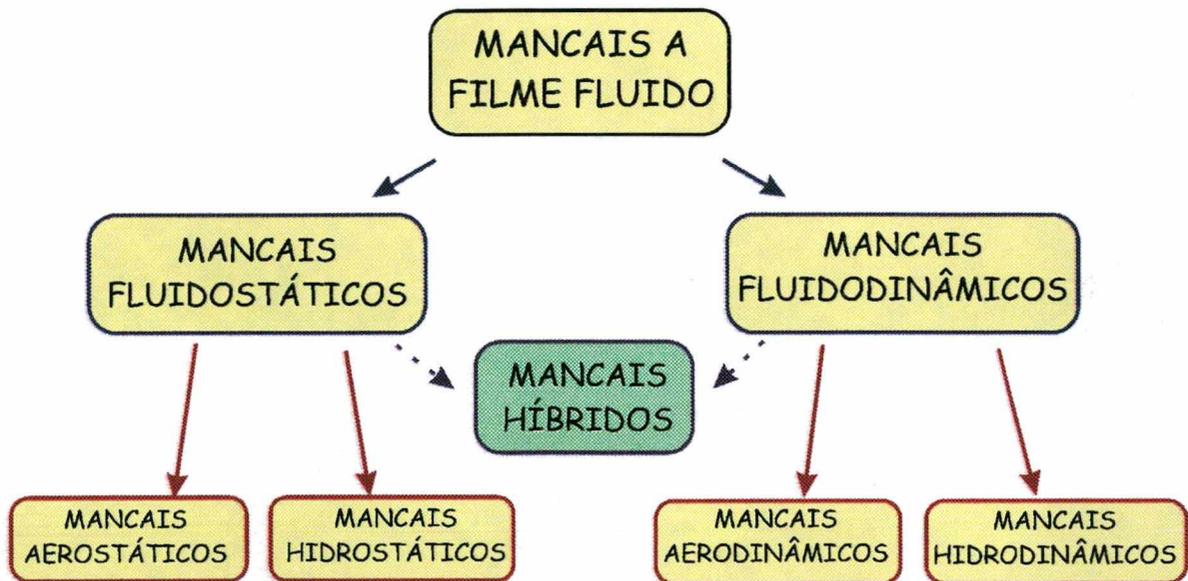


Figura 39 - Classificação de mancais a filme fluido.

Os mancais fluidostáticos possuem seu efeito principal de sustentação baseado na alimentação externa de fluido pressurizado. Se as condições operacionais do mesmo favorecerem o aparecimento dos efeitos de cunha e de filme espremido, estes se somarão à ação da alimentação externa de fluido, aumentando a capacidade de carga e a rigidez do mancal.

Nos mancais fluidodinâmicos, a sustentação é dada pelos efeitos de cunha e de filme espremido, pois não há alimentação externa de fluido. Desta forma, o mancal sempre necessita entrar em regime de operação para funcionar corretamente. É sempre necessário que exista o movimento relativo entre as superfícies do mancal.

Alguns pesquisadores desenvolveram mancais denominados híbridos que, apesar de serem externamente pressurizados, possuem uma geometria no rotor que favorece a atuação do efeito de cunha e melhoram as características do mancal durante a operação.

A) MANCAIS AERODINÂMICOS

O efeito principal de sustentação dos mancais aerodinâmicos é o efeito de cunha, com a utilização de fluidos gasosos, que geralmente é o ar.

Devido à baixíssima viscosidade do ar, necessita-se de altíssimas velocidades relativas entre os componentes do mancal para que o efeito de cunha gere a sustentação necessária. Disso pode-se concluir que este tipo de mancal não é indicado para carregamentos elevados e, muitas vezes, o peso próprio do rotor se torna crítico para o funcionamento do mancal.

Exemplos da utilização deste tipo de mancal fluídico são alguns modelos de turbinas de alta rotação para brocas odontológicas, as quais atingem velocidades de rotação acima dos 300.000 rpm. A figura 40 mostra uma destas ferramentas odontológicas.

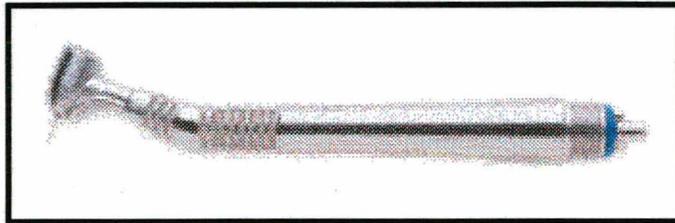


Figura 40 - Ferramenta odontológica com mancal aerodinâmico.

B) MANCAIS HIDRODINÂMICOS

Da mesma forma, o efeito principal de sustentação é o efeito de cunha, mas o fluido utilizado passa a ser líquido, mais precisamente o óleo mineral.

Este tipo de mancal é o mais simples em termos de projeto e fabricação e é o que a mais tempo vem sendo utilizado na construção de máquinas.

As velocidades relativas para gerar o efeito de sustentação no mancal hidrodinâmico são menores do que o aerodinâmico devido à viscosidade do óleo ser maior. Uma desvantagem relacionada a isto está no fato de que quando acontecem variações nesta velocidade relativa, há uma variação proporcional na força de sustentação do mancal, podendo alterar a sua posição de equilíbrio pelo deslocamento do centro de rotação.

Uma outra desvantagem está na grande variação que o óleo sofre na sua viscosidade quando se altera sua temperatura. Da mesma forma, isso irá alterar a força de sustentação do mancal e deslocará o seu centro de rotação. A situação ideal de operação exige uma temperatura estável do óleo e trabalho do mancal em regime permanente.

Em função do seu princípio operacional, é muito difícil a fabricação de peças de precisão utilizando-se cabeçotes de máquinas equipados com mancais hidrodinâmicos, já que seu centro de rotação pode se alterar durante o processo e, conseqüentemente, alterar a geometria da peça usinada.

O contato mecânico entre as partes do mancal só ocorre na sua partida, o que torna o desgaste muito pequeno.

Este tipo de mancal é muito encontrado em cabeçotes de retificadoras e em árvores de manivelas de motores a combustão interna. Nestes casos, são largamente conhecidos como “bronzinas”. A figura 41 mostra um motor de automóvel aberto, com destaque para os mancais hidrodinâmicos.



Figura 41 - Mancais hidrodinâmicos de um motor de automóvel.

C) MANCAIS AEROSTÁTICOS

As características deste tipo de mancal são amplamente discutidas no capítulo 2, que traz uma descrição bem detalhada sobre os mesmos.

D) MANCAIS HIDROSTÁTICOS

Da mesma forma que os mancais aerostáticos, estes recebem alimentação externa de fluido pressurizado. Neste caso, o fluido é o óleo e todas as suas características construtivas são adaptadas para otimizar sua operação com este tipo de fluido. Por exemplo, a espessura do filme de óleo é de 5 a 100 μm , que é um campo de folga relativa bem maior do que o encontrado em mancais lubrificados a ar. Isto se explica pela grande diferença de viscosidade encontrada entre o ar e o óleo [29].

Os mancais hidrostáticos são mais antigos do que os aerostáticos e possuem um campo de aplicação mais difundido. Eles são muito utilizados em máquinas-ferramentas de precisão, mas perdem campo quando há a necessidade de velocidades relativas mais altas. Sua desvantagem se encontra na variação da viscosidade com a temperatura, que altera muito suas características estáticas e dinâmicas. Em regime permanente, apresentam um comportamento bem definido.

Uma outra limitação se encontra na necessidade de coleta do fluido que sai do mancal, pois deve ser reutilizado. Além da coleta, este fluido deve sofrer uma filtragem adequada e, se necessário, um aquecimento na temperatura de regime para manter as características do mancal estáveis.

Por não existir contato mecânico entre as partes com movimento relativo nos mancais hidrostáticos, estes são isentos do efeito de “stick-slip”, que é totalmente indesejável quando se pretende obter este movimento de forma suave no mancal.

4.3.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS TIPOS DE MANCAIS

Na busca pela seleção do mancal mais adequado para equipar a mesa de retificação, deve-se confrontar os vários tipos de mancais tomando como base as características operacionais mais importantes exigidas para a mesa de retificação. Através de uma avaliação qualitativa de cada mancal em cada uma destas características, pode-se decidir sobre qual o tipo de mancal utilizar. Esta avaliação é mostrada no quadro 3, considerando os principais tipos de mancais apresentados.

| Característica | COM CONTATO | | SEM CONTATO | | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | deslizante | rolamento | hidrodinâmico | hidrostático | aerostático | magnético |
| operacional ↓ | | | | | | |
| amortecimento | <i>alto</i> | <i>baixo</i> | <i>alto</i> | <i>alto</i> | <i>baixo</i> | <i>baixo</i> |
| rigidez | <i>alta</i> | <i>moderada</i> | <i>alta</i> | <i>alta</i> | <i>moderada</i> | <i>alta</i> |
| capacidade carga | <i>alta</i> | <i>moderada</i> | <i>moderada</i> | <i>alta</i> | <i>baixa</i> | <i>alta</i> |
| atrito estático | <i>elevado</i> | <i>baixo</i> | <i>baixo</i> | <i>inexistente</i> | <i>inexistente</i> | <i>inexistente</i> |
| precisão de giro | <i>moderada</i> | <i>boa</i> | <i>boa</i> | <i>ótima</i> | <i>excelente</i> | <i>ótima</i> |
| custo | <i>baixo</i> | <i>baixo</i> | <i>baixo</i> | <i>moderado</i> | <i>baixo</i> | <i>alto</i> |
| desemp. ↓ velocidade | <i>bom</i> | <i>bom</i> | <i>bom</i> | <i>ótimo</i> | <i>excelente</i> | <i>bom</i> |
| desemp. ↑ velocidade | <i>ruim</i> | <i>regular</i> | <i>bom</i> | <i>bom</i> | <i>ótimo</i> | <i>excelente</i> |
| resist. ↓ temperatura | <i>boa</i> | <i>boa</i> | <i>boa</i> | <i>boa</i> | <i>excelente</i> | <i>boa</i> |
| resist. ↑ temperatura | <i>ruim</i> | <i>regular</i> | <i>boa</i> | <i>boa</i> | <i>excelente</i> | <i>boa</i> |
| resistência à umidade | <i>regular</i> | <i>boa</i> | <i>boa</i> | <i>boa</i> | <i>boa</i> | <i>boa</i> |
| vida | <i>baixa</i> | <i>regular</i> | <i>boa</i> | <i>boa</i> | <i>excelente</i> | <i>excelente</i> |

Quadro 3 - Comparação qualitativa entre os tipos de mancais rotativos [5, 3, 29, 30].

As características apresentadas no quadro 3 referem-se aos principais pontos que devem ser observados quando se procura adequar qualquer tipo de mancal rotativo a uma aplicação específica. Cada uma destas aplicações exigirá um desempenho diferente do mancal com relação a estas características mostradas.

Com relação ao carregamento imposto à mesa de retificação, o mancal rotativo deve suportar o peso próprio do rotor, a peça que está sendo usinada e a força de corte exercida pelo processo de retificação. Assim, como a força total sobre este mancal não é muito elevada, não é necessária uma capacidade de carga muito alta, tornando todos os tipos de mancais relacionados aptos à exigência de carregamento sobre a mesa. Isto também inclui os mancais aerostáticos que, em comparação com os demais, possuem uma baixa capacidade de carga.

Associada à capacidade de carga, está a rigidez, que é responsável pela manutenção da distância relativa entre a peça usinada e o rebolo durante a retificação. Apesar de haverem diferenças de rigidez entre os tipos de mancais apresentados, todos possuem uma rigidez aceitável para o processo, desde que sejam corretamente dimensionados. Isto ocorre devido à pequena

variação no carregamento sobre o mancal durante o processo. A definição de rigidez é baseada na relação entre a variação de carregamento imposta a um mancal e a correspondente variação de posição deste mancal na direção do carregamento. Desta forma, mesmo alguns mancais possuindo uma rigidez considerada moderada, a pequena variação de carregamento não é suficiente para deslocar o mancal de forma significativa.

O amortecimento é o responsável pela parcela dinâmica da operação do mancal. Como as retificadoras são máquinas que exigem que seus cabeçotes sejam corretamente balanceados, já deve-se partir de uma condição de baixas amplitudes de vibração no sistema, com a necessidade de se evitar frequências naturais dos mancais próximas das frequências de operação encontradas no processo. Os mancais do quadro 3 que possuem um baixo amortecimento devem ser corretamente projetados para que sua frequências críticas não sejam alcançadas durante o processo de retificação. Tomando-se esse cuidado, todos os tipos de mancais apresentados ficam aptos a serem utilizados na mesa de retificação.

O mancal rotativo da mesa de retificação deve possuir um ótimo desempenho em baixas velocidades, além da necessidade do atrito estático ser o menor possível. Como a mesa de retificação deverá operar com baixas velocidades de rotação, deve ser garantida a qualidade dos movimentos do mancal nestas velocidades, para garantir a qualidade das peças usinadas.

O desempenho em alta velocidade é citado somente para completar a tabela, sem interferir no processo de seleção do tipo de mancal a ser utilizado.

Quanto ao ambiente de usinagem, os mancais devem ser praticamente insensíveis a condições adversas de temperatura e umidade, já que a operação de retificadoras acontece em ambiente de chão de fábrica e sem controle destes parâmetros.

Em termos de custos, é muito importante que o custo de aquisição do mancal seja acessível e que este possua vida suficiente para que não necessite de muita manutenção. Desta forma, deve-se sempre fazer uma análise da relação “custo x benefício” antes da decisão sobre a aquisição de um determinado tipo de mancal.

Concluindo, a característica de precisão de giro, que se refere à qualidade da trajetória descrita no movimento do mancal, é a mais importante, visto que as exigências de qualidade superficial e de forma das peças usinadas estão em níveis bastante difíceis de serem alcançados. Assim, quanto melhor é a precisão de giro fornecida pelo mancal, melhor será a qualidade da superfície usinada sobre o mesmo.

Com base nestas prescrições relacionadas à mesa de retificação, procura-se um mancal

rotativo que possua o melhor desempenho possível em baixa velocidade, o menor atrito estático possível, alta resistência a condições adversas de ambiente de usinagem, baixo custo, alta vida útil e a melhor precisão de giro possível.

Da comparação mostrada no quadro 3, pode-se concluir que o tipo de mancal que melhor atende a estas exigências da mesa de retificação é o mancal aerostático. O ponto crítico a ser observado na utilização deste tipo de mancal é o correto dimensionamento dos seus parâmetros geométricos para que atinja valores de capacidade de carga e rigidez suficientes para a mesa, além de possuir frequências críticas bem superiores às frequências de operação da mesa.

4.4. FUNÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO RADIAL DA MESA

Guias são elementos estruturais que permitem a um componente deslizar com relação a outro, seguindo uma trajetória padrão dada. Em guias lineares, este padrão de movimento é retilíneo e geralmente é restrito a um grau de liberdade.

As guias são elementos tão importantes quanto os cabeçotes em máquinas-ferramentas, pois descrevem a trajetória de movimentos em direções sensíveis da máquina, que definirão a geometria das peças usinadas nas mesmas. Desta forma, devem ser suficientemente rígidas para que não hajam desvios desta trajetória durante a operação de usinagem, onde são geradas forças estáticas e dinâmicas que podem alterar a sua exatidão geométrica.

Como os mancais rotativos, as guias recebem uma classificação de acordo com o seu princípio de funcionamento, podendo assumir as mais diversas formas construtivas, de acordo com a necessidade imposta pelo projeto.

Estas formas construtivas dependem do tipo e direção do carregamento imposto sobre as guias. Quanto à forma, as guias podem ser cilíndricas ou prismáticas e, além disso, abertas ou fechadas [30].

A qualidade do movimento em guias lineares é diretamente influenciada pelo curso necessário ao movimento da guia. Quanto maior o curso exigido da guia, mais difícil fica de garantir uma trajetória com pequenos desvios com relação ao padrão exigido.

A classificação de acordo com o princípio de funcionamento das guias é apresentada na figura 42.

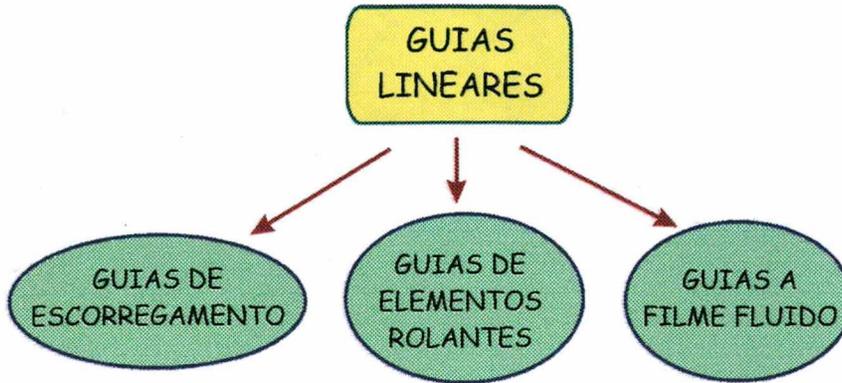


Figura 42 - Classificação das guias lineares.

4.4.1. GUIAS DE ESCORREGAMENTO

Apesar de ser o tipo de guia com custo mais acessível, também é o tipo que apresenta a menor precisão de posicionamento e o maior atrito no movimento. São as guias mais encontradas em máquinas-ferramentas convencionais, onde a precisão envolvida não é tão elevada [30].

Um estudo bastante detalhado envolvendo dimensionamento e cálculos estáticos e dinâmicos deste tipo de guias pode ser observado no trabalho desenvolvido por CASTRO [31], que fornece uma orientação para a seleção e projeto de guias para máquinas-ferramentas.

Para aplicações onde é exigida uma maior precisão nas trajetórias descritas pela guia linear, as guias de escorregamento não são as mais indicadas, principalmente pela existência do efeito de *stick-slip*, que eleva bastante os erros de linearidade nas trajetórias.

Na figura 43 é mostrada uma guia de escorregamento de uma máquina.

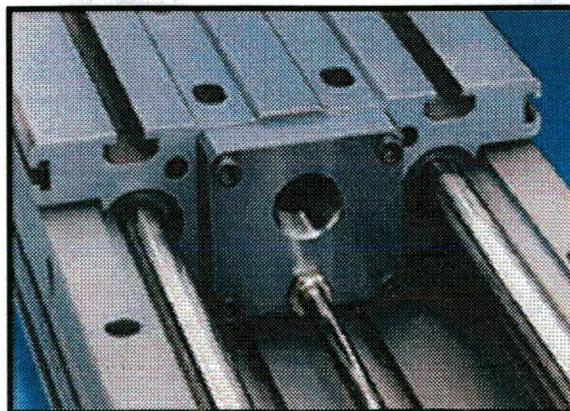


Figura 43 - Guia de escorregamento.

4.4.2. GUIAS DE ELEMENTOS ROLANTES [32]

As guias lineares com elementos rolantes são utilizadas em substituição aos barramentos de máquinas-ferramentas desde o início dos anos 80. Isto ocorre devido à otimização das características deste tipo de componente. As guias possuem alta precisão, alta rigidez e uma ótima suavidade de movimento, isento do efeito de *stick-slip*.

Como os mancais de elementos rolantes, as guias podem ser encontradas com uma vasta variação de concepções e características operacionais, sempre de forma modular, permitindo que os projetistas de máquinas e equipamentos calculem a situação de carregamento do seu sistema e escolham o tipo e forma de guia linear de elementos rolantes que melhor satisfaça sua necessidade.

Como sistema modular, as guias lineares são produzidas em maior escala, o que torna o seu custo menor comparado às guias produzidas para aplicações específicas.

Na figura 44 é mostrada uma guia linear de elementos rolantes na forma mais convencional utilizada em máquinas e equipamentos.

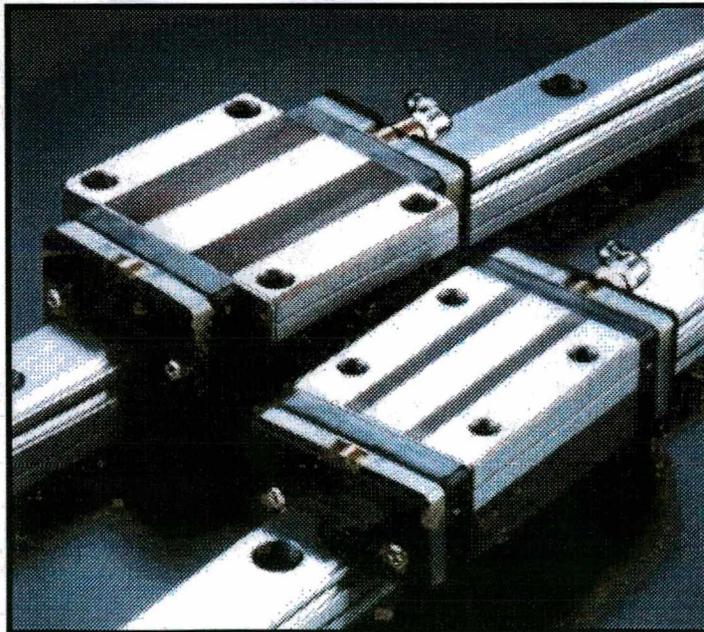


Figura 44 - Guias de elementos rolantes [32].

O princípio de funcionamento das guias de elementos rolantes se assemelha bastante aos mancais do mesmo tipo, como foi descrito no item 4.3.2.

A classificação das guias se baseia em dois critérios básicos: o tipo de elemento rolante utilizado e o modo de movimentação destes elementos.

Os elementos rolantes utilizados em guias são as esferas, os rolos cilíndricos e os rolos em forma de agulha. As guias com esferas possuem uma capacidade de carga menor, com um movimento mais suave, o que permite a utilização de velocidades mais altas.

O modo de movimentação destes elementos pode ser com ou sem recirculação. As guias sem recirculação possuem um curso bastante reduzido, já que é necessário que haja elementos rolantes sobre todo o comprimento da guia onde haverá movimento. As guias com recirculação não possuem limitação de comprimento da pista, já que os elementos rolantes são recolocados entre a pista e o carro quanta vezes forem necessárias. Desta forma, a dependência do comprimento da pista só existe com relação à qualidade dimensional da mesma, para que o correto funcionamento da guia seja garantido.

4.4.3. GUIAS A FILME FLUIDO

As guias lubrificadas a filme fluido foram desenvolvidas como alternativas às guias de escorregamento e de elementos rolantes, como resultado da procura pela maior precisão de deslocamento e posicionamento e velocidades mais elevadas [30].

As primeiras guias lubrificadas a filme fluido foram as de lubrificação hidrodinâmica, aprimoradas a partir das guias de escorregamento com a adição de rebaixos que armazenavam o fluido lubrificante e formavam bolsas de lubrificação, favorecendo a formação do efeito de cunha, responsável pela sustentação.

As guias hidrostáticas surgiram quando se percebeu que a lubrificação hidrodinâmica nesta situação era falha e provocava instabilidades decorrentes das variações de velocidade relativa.

Os principais fluidos em uso atualmente são o óleo e o ar. Suas vantagens e desvantagens acompanham o que foi descrito com relação a mancais rotativos. Desenvolvimentos mais recentes, e ainda a nível de laboratório, sugerem a utilização de guias hidrostáticas de cerâmica e com água como fluido. Antes, os problemas de corrosão que a água apresenta impossibilitaram sua utilização em mancais construídos com materiais metálicos [12].

Guias lubrificadas a filme fluido empregadas em máquinas-ferramentas de ultraprecisão e instrumentos de medição requerem um projeto específico, bem como uma fabricação bastante criteriosa, o que as torna elementos de alto custo.

4.4.4. COMPARAÇÃO ENTRE AS GUIAS LINEARES

No quadro 4 são apresentadas as principais características das guias lineares apresentadas, com uma comparação qualitativa entre as mesmas.

A partir da análise desta comparação, pode-se indicar qual é o tipo de guia linear mais indicado para a mesa de retificação.

| Característica ↓ | escorregamento | rolamento | hidrostática | aerostática |
|-------------------------|-----------------------|------------------|---------------------|--------------------|
| custo | baixo | médio | alto | médio |
| capacidade carga | alta | alta | média | baixa |
| fabricação | fácil | média | difícil | média |
| rigidez | alta | alta | média | baixa |
| precisão desloc. | baixa | média | alta | alta |
| vida | baixa | baixa | alta | alta |

Quadro 4 - Comparação entre as guias lineares.

O movimento radial da mesa de retificação será feito pela guia linear. Basicamente, a configuração da mesa terá o mancal rotativo montado sobre a guia. Desta forma, a guia linear deverá ter condições de suportar o peso do mancal rotativo, do dispositivo de fixação da peça a ser usinada e da própria peça, mais a força de usinagem proveniente do processo de retificação.

Como a força resultante deste carregamento sobre a guia não é elevada, todos os tipos de guias apresentados possuem capacidade de carga suficiente para suportá-la..

O peso dos componentes citados não se alterará significativamente durante a usinagem. A única componente do carregamento sobre a guia que pode se alterar e mudar a força total sobre a guia é a força de usinagem na retificação.

A força de usinagem não é elevada e não sofre grandes variações durante o processo de

usinagem, já que a mesa de retificação fará operações de acabamento. Assim, a rigidez necessária à guia para a operação da mesa não é necessariamente alta, o que torna todas as guias apresentadas aptas a equiparem a mesa de retificação.

A qualidade de forma da superfície usinada sobre a mesa de retificação depende muito da qualidade da trajetória descrita pela ferramenta de corte. Quanto melhor for esta trajetória, mais fácil será a obtenção de uma superfície com baixos erros de forma. Guias de escorregamento não fornecem uma qualidade de trajetória compatível com as exigências das peças a serem produzidas pela mesa de retificação [31].

O custo da guia deve ser sempre o menor possível associado a uma alta vida do componente. Uma outra característica associada ao custo é a fabricação das guias. Guias com elementos rolantes são padronizadas e podem ser compradas em módulos para montagem. As demais, dependendo da aplicação, devem ser projetadas e fabricadas de forma conveniente à aplicação a que se destinam.

As guias hidrostáticas devem ser alimentadas externamente com óleo e, por isso, apresentam problemas de tratamento e coleta deste óleo que, na operação de retificação, pode se misturar com o fluido refrigerante e ficar contaminado, perdendo suas características. Sendo assim, um sistema de vedação adequado para guias hidrostáticas tornaria o projeto muito caro.

Em termos de características operacionais, as guias aerostáticas são superiores às de elementos rolantes para esta aplicação, mas possuem um custo agregado mais elevado. Este custo leva em conta a fabricação da guia e o sistema auxiliar de alimentação de ar.

O custo das guias de elementos rolantes depende da classe de precisão exigida. Quanto mais elevada é esta classe, mais caras são as guias. Para esta aplicação, as guias de elementos rolantes ideais devem possuir uma classe alta de precisão [32].

O suprimento de ar para as guias aerostáticas não é um problema neste caso devido ao mancal rotativo ser aerostático. Uma mesma linha de ar tratado pode alimentar tanto o mancal rotativo quanto as guias. A maior dificuldade encontrada para a utilização deste tipo de guia é o seu custo de fabricação.

Um fator muito importante a ser considerado é a experiência do grupo onde está sendo realizado este trabalho em fabricar guias aerostáticas. O grupo no LMP desenvolveu diversas técnicas de fabricação que reduzem muito o custo final da guia, como pode ser visto no trabalho desenvolvido por STOETERAU [2]. Esta experiência torna possível a utilização de guias lineares aerostáticas na mesa de retificação.

4.5. FUNÇÃO DE MOVIMENTAÇÃO AXIAL DA MESA

Esta função é responsável pelo movimento de aproximação e mergulho do rebolo contra a peça a ser usinada, ajustando a profundidade de corte a ser utilizada durante o processo.

Para realizar este movimento, são utilizadas guias lineares. Como esta profundidade de corte não é variável durante a usinagem, a exigência de qualidade de movimento da guia não é muito grande. Assim, a relação de guias apresentada satisfaz a condição para este movimento.

Como não há a necessidade de uma guia especial para esta função, pode-se utilizar o próprio sistema de movimentação axial da máquina-ferramenta utilizada. Este sistema já é apropriado para fornecer profundidade de corte para operações de retificação e é encontrado em qualquer máquina onde seja instalada a mesa de retificação.

4.6. FUNÇÃO DE INCLINAÇÃO DA MESA

A inclinação da mesa é responsável pelo controle da conicidade da sapata plana retificada. Da mesma forma que a profundidade de corte, uma vez posicionada a inclinação, esta não é alterada durante a usinagem. A única exigência deste movimento é que seja possível trabalhar em uma faixa de inclinações bastante pequena com ajustes precisos na posição da mesa. Isto ocorre devido à necessidade de uma conicidade controlada e com ordem de grandeza muito pequena. Como foi visto no capítulo 2, recomenda-se uma diferença na folga da sapata plana do centro para a periferia de aproximadamente 70% do valor nominal da folga do mancal. Como esta folga nominal se encontra entre 5 a 25 μm , a conicidade exigida é muito pequena.

Para obter-se a inclinação da mesa pode-se apoiá-la sobre um mancal de escorregamento com liberdade de movimento somente na rotação em torno de um eixo, ou então pode-se apoiá-la sobre três pontos definindo um plano de apoio. Se em pelo menos um dos pontos de apoio for possível alterar sua altura, isso resultará numa inclinação da mesa com relação à base. Na figura 45 são mostrados os dois sistemas citados.

O apoio sobre três pontos é o melhor sistema, pois permite um ajuste fino da inclinação da mesa. Isto pode ser feito através de parafusos simples de rosca fina (passo pequeno) ou com parafusos diferenciais.

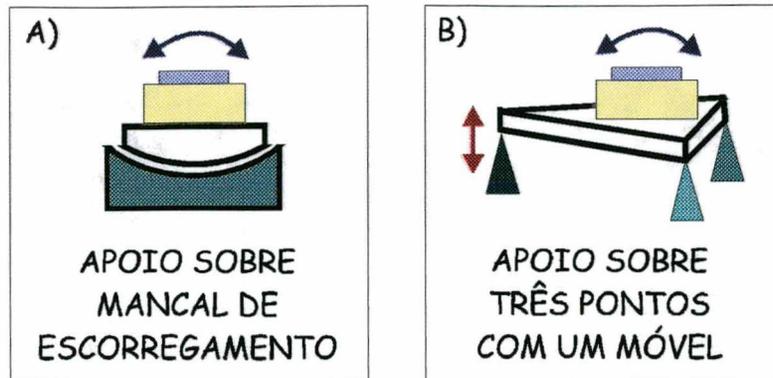


Figura 45 - Inclinação da mesa de retificação.

Os parafusos diferenciais caracterizam-se por possuírem uma bucha com uma rosca interna com passo diferente da rosca externa. Com isso, quando uma volta é dada no parafuso, este se desloca axialmente em um valor igual à diferença de passo entre as duas roscas [1]. Por exemplo, se o parafuso diferencial possui uma rosca interna de passo igual a 1 mm e a rosca externa de passo igual a 0,8 mm, quando for dada uma volta, este deslocará os componentes montados sobre si em um valor igual a 0,2 mm. Com isso, frações de rotação do parafuso diferencial equivalem a variações muito pequenas na altura do apoio. Por outro lado, se a distância entre os pontos de apoio for cada vez maior, esta pequena variação na altura resultará em uma variação cada vez menor na inclinação da mesa.

Concluindo, o apoio sobre três pontos com variação de altura com parafuso diferencial é a melhor solução para a mesa de retificação, por ser mais sensível na regulagem da inclinação e também por ser de fácil fabricação.

4.7. FUNÇÃO DE FIXAÇÃO DA PEÇA A SER USINADA

A fixação da peça a ser usinada é uma das funções mais importantes durante o processo de usinagem, pois garante a qualidade do processo. Caso não seja utilizado um dimensionamento correto, pode interferir no resultado final da usinagem.

Em termos de segurança, o sistema de fixação deve permitir uma sujeição rígida da peça para que esta não corra o risco de se soltar durante a usinagem, o que poderia causar um acidente com danos materiais ou mesmo ao operador da máquina. Assim, esta sujeição deve ser altamente confiável para que não hajam problemas.

Por outro lado, se a sujeição for muito rígida, podem ocorrer deformações na peça provenientes dos esforços impostos pela própria fixação. Quando a peça for solta, tenderá a aliviar estas tensões e aparecerão diversos erros de forma não previstos na peça, comprometendo sua qualidade. Assim, deve-se encontrar um sistema ótimo de sujeição sem deformação da peça.

Outras características importantes são o custo do sistema de fixação e a precisão de posicionamento. Se uma peça possui uma referência para as operações de usinagem a serem feitas, o sistema de fixação deve garantir que esta referência seja a mesma que a máquina tomará como base, para que não sejam induzidos erros sistemáticos na peça provenientes de mal posicionamento da peça na máquina.

4.7.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS TIPOS DE SISTEMAS DE FIXAÇÃO

No quadro 5 são apresentados os sistemas de fixação mais usuais e uma comparação qualitativa entre suas características.

| Característica ↓ | placa | pinça | vácuo | dispositivo | magnético | térmico |
|------------------|-------|-------|------------|-------------|-----------|-------------|
| custo | baixo | baixo | médio | alto | baixo | médio |
| deformação peça | alta | média | baixa | baixa | baixa | muito baixa |
| sujeição | alta | alta | média | alta | alta | média |
| precisão | média | alta | muito alta | alta | alta | alta |

Quadro 5 - Sistemas de fixação.

No caso da mesa de retificação, existe uma limitação grande no fato de que o sistema de fixação deve ser montado sobre o mancal rotativo, o que torna alguns dos sistemas apresentados difíceis de serem implementados.

A fixação magnética pode ser feita com imã permanente ou eletroimã. O eletroimã necessita de contatos elétricos para ser acionado, o que não pode existir no mancal aerostático por não haver contato entre as superfícies do mesmo. O imã permanente não é aconselhado por atrair os cavacos do processo e tornar difícil a limpeza da placa a cada troca de peça. Se o mancal rotativo for ferromagnético, seu funcionamento pode ser prejudicado.

O sistema a vácuo possui uma sujeição menos confiável que os demais e, além disso, necessita de equipamentos auxiliares para a geração do vácuo, o que não condiz com a condição da mesa de retificação ser um dispositivo portátil.

A fixação térmica é descartada pelo fato de haver a presença de fluido de corte na retificação. Este fluido de corte retiraria muito calor da placa, impossibilitando seu funcionamento.

Dispositivos são sistemas produzidos especialmente para determinadas peças. Sua utilização é justificada quando existe produção seriada de um componente, o que não acontece na mesa de retificação. Para esta aplicação, um dispositivo se tornaria muito caro.

Da mesma forma, pinças são produzidas para dimensões padronizadas. Cada diâmetro exige uma pinça específica. Assim, se for feita uma variação nas dimensões das peças usinadas, será necessário um conjunto de pinças equivalentes, o que também não possui um custo baixo.

Por fim, restaram as placas. Quanto à precisão de posicionamento, se for feito um bom trabalho de centragem da peça na placa, esta precisão chega a valores aceitáveis. Além disso, é um sistema relativamente barato.

A deformação nas peças pode ser reduzida com a utilização de elementos de apoio para a fixação corretamente dimensionados.

4.8. FUNÇÃO DE CONTROLE DO AMBIENTE DE USINAGEM

O ambiente de usinagem para a mesa de retificação deve ser o mesmo encontrado em qualquer máquina retificadora, já que a mesa deve ser utilizada como dispositivo destas máquinas. Desta forma, não há exigência de controle de temperatura e umidade do local onde a máquina está montada. A única exigência é o sistema de suprimento de fluido de corte para a região de trabalho, que é encontrado em todos os tipos de máquinas retificadoras, não exigindo um sistema específico acompanhando a mesa de retificação.

4.9. CONCEPÇÃO FINAL DA MESA DE RETIFICAÇÃO

Segundo o procedimento descrito sobre matrizes morfológicas, deveriam ser apresentadas diversas concepções para a mesa de retificação considerando a combinação de todos os possíveis componentes para a mesa.

Como se fez um estudo bastante direcionado para a escolha de uma solução ideal para a mesa, à medida que as funções foram detalhadas, foram apontados os melhores componentes para a mesa de retificação, levando-se em consideração todos fatores importantes nesta escolha, desde as características operacionais até as condições para a fabricação de protótipo da mesa para ensaios.

Desta forma, a mesa de retificação terá estes componentes mostrados na figura 46.

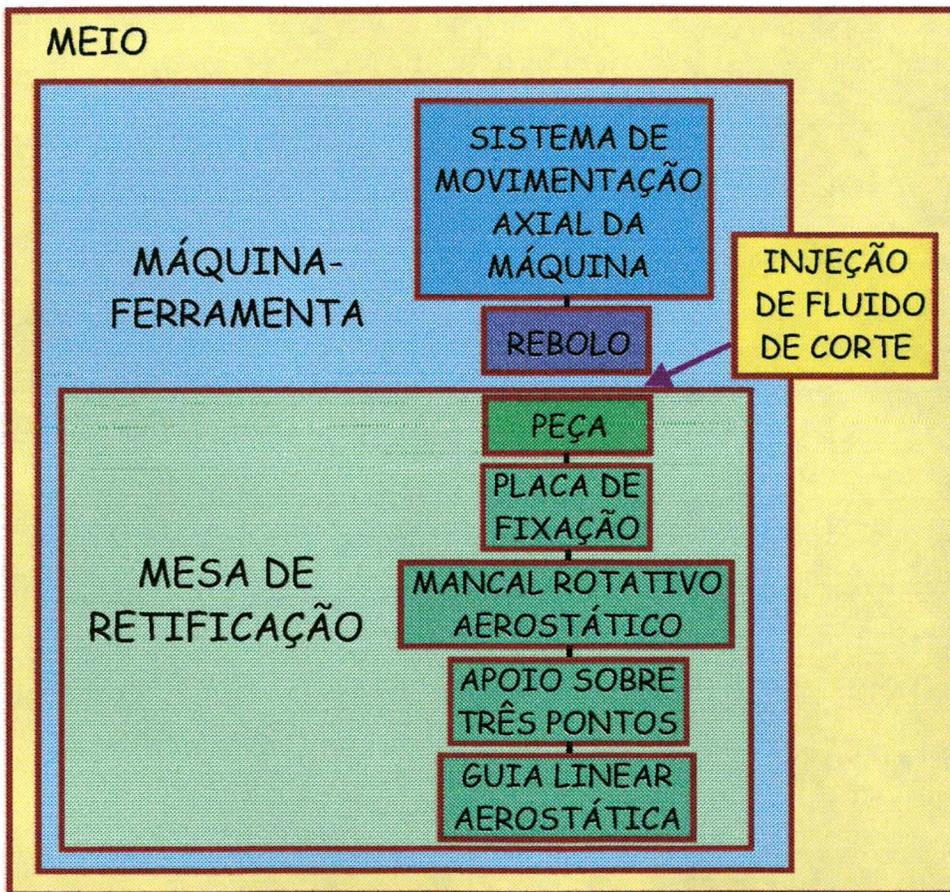


Figura 46 - Configuração final da mesa de retificação.

A próxima etapa do trabalho consiste em projetar detalhadamente cada um destes componentes visando sua posterior fabricação.

CAPÍTULO 5

PROJETO DETALHADO DA MESA DE RETIFICAÇÃO

Nunca andes pelos caminhos traçados, pois eles conduzem somente até onde os outros já foram.

Alexander Graham Bell (1847-1922).

5.1. INTRODUÇÃO

Definidos os princípios de solução a serem empregados no projeto da mesa de retificação, parte-se para as etapas de projeto preliminar e projeto detalhado dos componentes da mesa.

Cada componente será tratado individualmente, mas prevendo-se que trabalhará em conjunto com os demais.

5.2. PROJETO DO MANCAL ROTATIVO AEROSTÁTICO

5.2.1. ESCOLHA DA CONCEPÇÃO DO MANCAL

O primeiro passo do projeto de um mancal rotativo aerostático é a definição de que tipo ou concepção de mancal será utilizada. Através da figura 6 pode-se observar a variedade de concepções possíveis de mancais rotativos. Entre as concepções mais utilizadas destacam-se: a *Yate*, composta por dois mancais planos de sapata circular com alimentação anular e um mancal radial cilíndrico, a esférico-plana e a duplo-esférica.

Todas as três formas citadas já foram construídas no Laboratório de Mecânica de Precisão. O primeiro mancal foi desenvolvido por Rocha [3], e tratava-se de um mancal esférico-plano. O segundo foi desenvolvido por Oliveira [4], com concepção duplo-esférica. Por fim, veio o trabalho de Müller [5], que explorou a concepção *Yate*.

Todos os três mancais apresentaram ótimos resultados e a maioria dos problemas de fabricação dos mesmos é dominada pela equipe do laboratório. Dos três, o que apresenta um melhor desempenho é o *Yate* mas, em contrapartida, é o mais difícil de ser fabricado devido à falta

de máquinas especializadas para atender às suas exigências dimensionais. Por depender de equipamentos de outras instituições para a fabricação deste tipo de mancal, decidiu-se por não utilizá-lo na mesa de retificação, apesar de existir um projeto desenvolvido por Müller [33] de um mancal *Yate* voltado para esta aplicação.

Os demais mancais possuem a vantagem de possuírem formas básicas relativamente fáceis de serem fabricadas nas tolerâncias especificadas. A semi-esfera é obtida por usinagem e posterior lapidação esférica, com base em um trabalho desenvolvido por Vallejos [34]. A sapata plana, apesar de ainda não existir uma mesa de retificação para otimizar sua conicidade, pode ser obtida por torneamento e posterior lapidação plana, bastante explorada no trabalho desenvolvido por Crichigno F° [35].

A utilização de formas esféricas em mancais aerostáticos traz a vantagem da absorção de desalinhamentos de montagem pela forma esférica. O único prejuízo quando isto acontece é que o eixo de rotação do rotor não será o mesmo eixo geométrico do mesmo. Com isso, é induzido um problema de desbalanceamento no rotor, podendo se tornar crítico quando se trabalha com velocidades de rotação mais elevadas no mancal.

Das duas formas possíveis, escolheu-se trabalhar com o mancal esférico-plano por ser mais compacto e por fornecer capacidade de carga e rigidez axiais maiores trabalhando-se sobre o lado plano do mancal. Esta direção sensível é a mais importante durante a usinagem dos componentes sobre a mesa.

A solicitação maior será feita sobre o lado plano do mancal, com o lado esférico sendo utilizado para fornecer capacidade de carga e rigidez radial e um pré-carregamento do mancal plano, garantindo uma folga máxima de trabalho cujos valores de rigidez e capacidade de carga axial são os mínimos aceitáveis. A figura 47 representa esquematicamente esta situação.

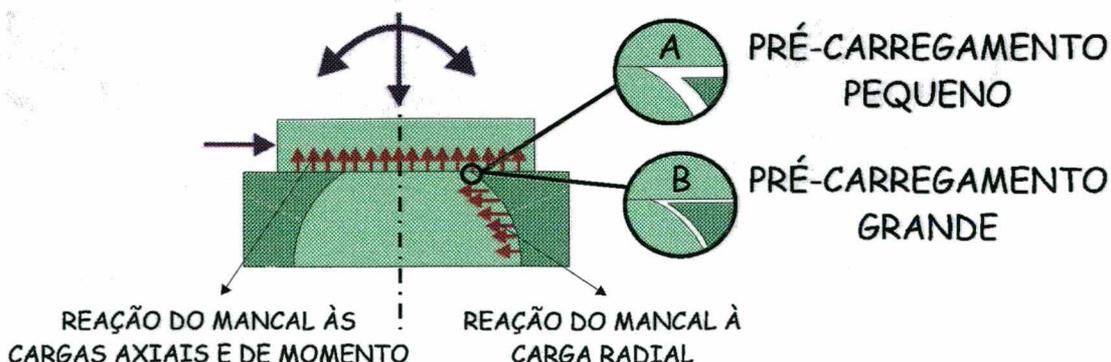


Figura 47 - Carregamento sobre um mancal esférico-plano.

No caso A, o pré-carregamento é pequeno, então a folga na sapata plana é grande, tornando sua capacidade de carga e rigidez menores. No caso B, é aplicado um pré-carregamento maior, e a folga inicial é bem menor.

Quando carregado axialmente, o mancal esférico fica aliviado do pré-carregamento. Nesta condição, a rigidez e a capacidade de carga de momento do mancal tem sua maior parcela suportada pela sapata plana.

5.2.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS INICIAIS DO MANCAL

Escolhida a concepção a ser utilizada, parte-se para o dimensionamento do mancal. Existem duas formas de iniciar o projeto de um mancal aerostático:

- Definir valores de algumas características operacionais para o mancal e, a partir destes, determinar as características construtivas e as dimensões a serem utilizadas; e
- Definir dimensões limites para os componentes e, a partir destas, determinar as características operacionais e construtivas do mancal.

O primeiro caso é comum quando se trabalha no limite operacional dos mancais aerostáticos. Sabe-se que o mancal deve suportar um determinado carregamento e espera-se que o mesmo opere com uma rigidez especificada. A partir disto, encontra-se a condição ideal de folga, alimentação de ar e a área de sustentação para o mancal. Isto é possível através da aplicação de diversas teorias para cálculo e dimensionamento de mancais aerostáticos. Estas teorias empregam uma análise teórica comprovada e corrigida com resultados experimentais [5].

Como exemplo, pode-se observar a teoria desenvolvida por Stout e apresentada por Slocum [12]. Nesta, várias equações são apresentadas para diversas formas básicas de mancais, como as sapatas planas circulares com alimentação anular, que é o tipo de mancal plano empregado no mancal esférico-plano.

Utilizando as mesmas teorias, mas com uma abordagem diferente, se houver um dimensionamento pré-definido, pode-se determinar as características operacionais do mancal com uma pequena margem de erro. Este dimensionamento se baseia em valores fixos das dimensões impostos pelo projeto.

Como o trabalho neste mancal vai se concentrar sobre o lado plano, este será tratado analiticamente para posterior confirmação dos resultados. Quanto ao lado esférico, existe um

trabalho desenvolvido por Prata e Freitas [36,37] que simula a condição encontrada em mancais esféricos moldados, utilizando restritores fabricados através de fios de nylon, como descreve o trabalho de Oliveira [4]. Neste trabalho, os resultados teóricos são comparados com os resultados práticos obtidos no mancal duplo-esférico desenvolvido por Oliveira [4]. Como conclusão, houve uma concordância muito boa destes resultados [36,37].

Desta forma, como o mancal esférico deste trabalho possui as mesmas dimensões básicas do mancal apresentado por Oliveira [4], sabe-se que seus resultados de desempenho serão perfeitamente aceitáveis para a mesa de retificação.

O procedimento utilizado para o projeto do mancal da mesa de retificação teve que partir de dimensões básicas para o mancal. Isto ocorreu devido às limitações de fabricação encontradas no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP). Estas limitações são listadas abaixo:

- O mancal deve ser o mais compacto possível para que a mesa de retificação não restrinja muito a área de trabalho da máquina retificadora;
- A semi-esfera utilizada deve possuir um diâmetro de 100 mm, que é a dimensão padrão de esfera utilizada em todos os mancais esféricos de maior porte produzidos no LMP;
- Os restritores de alimentação de ar devem ser de orifício sem rebaixo, pois a dificuldade de fabricação de outros tipos de restritores impede sua utilização. Os orifícios sem rebaixo são facilmente produzidos por moldagem com uma boa repetibilidade nas suas dimensões;
- O diâmetro dos orifícios dos restritores deve ser de 0,18 mm, que é o menor diâmetro produzido por moldagem com sucesso no LMP. Diâmetros maiores não interessam a este trabalho por apresentarem resultados inferiores de capacidade de carga e rigidez;
- A pressão de alimentação de ar em regime deve ser de 6 bar, que é a pressão normal da linha do laboratório;
- A vazão de ar para o mancal deve ser limitada para não exceder a capacidade da linha instalada no laboratório; e
- O projeto dos componentes do mancal deve ser compatível com os equipamentos disponíveis no laboratório para fabricá-los.

5.2.3. ANÁLISE TEÓRICA DO MANCAL PLANO

Segundo a metodologia apresentada por Slocum [12], as equações mostradas no quadro 6

fornecem valores teóricos otimizados para máxima rigidez de mancais planos de sapata circular, com alimentação anular, e restritores de orifício sem rebaixo. Através da aplicação destas equações, tem-se uma ótima estimativa do comportamento do mancal.

| PARÂMETRO | EQUAÇÃO |
|--|--|
| Rigidez máxima (N/μm) | $K_{max} = \frac{0,29 \cdot \pi \cdot (R_0^2 - R_i^2) \cdot (P_0 - P_a)}{h_0}$ |
| Rigidez angular (N/μrad) | $K_A = \frac{0,23 \cdot \pi \cdot (R_0^2 - R_i^2) \cdot R_0 \cdot R_i \cdot (P_0 - P_a)}{h_0}$ |
| Capacidade máxima de carga (N) | $W_{max} = 0,26 \cdot \pi \cdot (R_0^2 - R_i^2) \cdot (P_0 - P_a)$ |
| Vazão de ar (m ³ /s) | $Q = \frac{0,27 \cdot h_0^3 \cdot P_0^2}{6,84 \cdot 10^{18} \cdot \ln\left(\frac{R_0}{R_i}\right)}$ |
| Diâmetro do orifício do restritor (mm) | $d_f = \frac{2 \cdot \Lambda_s \xi \cdot h_0^2 \cdot P_0}{31,55 \cdot 10^6 \cdot n \cdot \ln\left(\frac{R_0}{R_i}\right)}$ |

Quadro 6 - Equações para o projeto de mancais planos de sapata circular com alimentação anular e restritores de orifício sem rebaixo [12].

Estas equações só necessitam de parâmetros geométricos e de alimentação de ar do mancal. Na figura 48 são apresentados alguns desses parâmetros necessários para o cálculo das características operacionais do mancal.

Segundo Slocum [12], existe uma exigência básica para que o mancal opere de maneira previsível e seu desempenho corresponda aos cálculos das equações do quadro mostrado. Esta exigência é que a área do orifício do restritor seja pelo menos duas vezes maior do que a área da cortina de fluxo de ar formada na saída do restritor. Desta forma:

$$\frac{\pi \cdot d_f^2}{4} \cdot \frac{1}{\pi \cdot d_f \cdot h_0} = \frac{d_f}{4 \cdot h_0} \geq 2 \quad (1)$$

Como $d_f = 0,18$ mm e $h_0 = 8$ μm, esta condição é perfeitamente atendida.

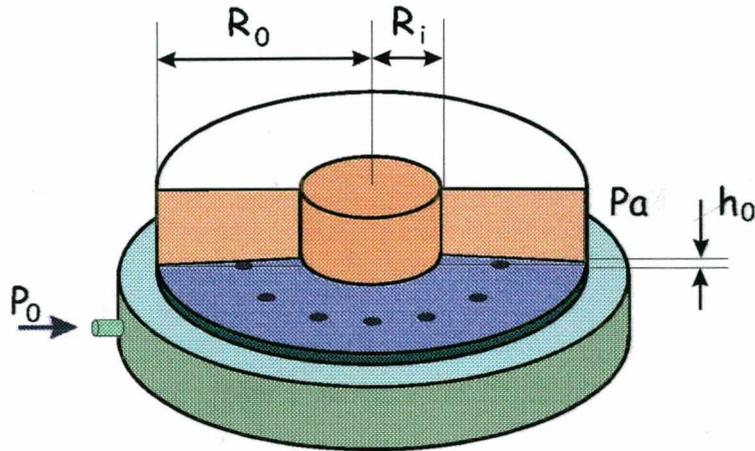


Figura 48 - Parâmetros necessários para o cálculo das características do mancal.

A folga de $8 \mu\text{m}$ foi escolhida devido aos limites tecnológicos envolvidos para se atingir uma condição de erro de forma e rugosidade aceitáveis para a operação do mancal plano. Caso seja possível a operação em folgas menores, isto acontecerá em favor da segurança, pois estas folgas menores fornecerão valores maiores de capacidade de carga e rigidez para o mancal.

Os valores de projeto dos parâmetros apresentados na figura 48 são:

- $R_o = 60 \text{ mm}$;
- $R_i = 21 \text{ mm}$;
- $P_0 = 6 \text{ bar}$;
- $P_a = 1 \text{ atm}$; e
- $h_0 = 8 \mu\text{m}$.

Com estes valores, pode-se calcular os parâmetros operacionais teóricos do mancal, como mostra o quadro 7.

| PARÂMETRO | VALOR TEÓRICO |
|--|--|
| Rigidez máxima ($\text{N}/\mu\text{m}$) | 179,4 $\text{N}/\mu\text{m}$ |
| Rigidez angular ($\text{N}/\mu\text{rad}$) | 0,18 $\text{N}/\mu\text{rad}$ |
| Capacidade máxima de carga (N) | 1286 N |
| Vazão de ar (m^3/s) | $6,93 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} = 0,416 \text{ l/min}$ |

Quadro 7 - Valores teóricos dos parâmetros operacionais do mancal plano.

Nota-se que no quadro não é apresentado o cálculo do diâmetro do restritor. Isto ocorre porque o restritor já possui um diâmetro pré-definido. A equação do diâmetro será usada então para o cálculo do número de restritores necessários ao mancal (n) para os parâmetros geométricos e de pressão já fornecidos e para um parâmetro de alimentação ($\Lambda_s \xi$) igual a 0,60, que é o valor ótimo para a condição de máxima rigidez.

Calculando essa equação, encontra-se um valor de número de restritores de aproximadamente 12 restritores. Da mesma forma que o mancal plano, também serão utilizados 12 restritores no mancal esférico.

5.2.4. SISTEMA DE AJUSTE DA FOLGA DE TRABALHO DOS MANCAIS

No capítulo 2 foi destacada a importância da folga de trabalho de um mancal aerostático. Sendo assim, é necessário que esta folga seja corretamente ajustada e mantida durante a operação do mancal.

Para que este ajuste de folga seja possível, já na fase de projeto deve ser previsto um mecanismo de ajuste da mesma, com a possibilidade de alcançar folgas pequenas e uniformes.

Esta folga pode ser ajustada de três formas:

1. Montagem do rotor (plano + esfera), com a utilização de elementos intermediários com dimensão pré-definida (figura 49-A). Neste procedimento, mede-se a distância entre as faces externas dos mancais com folga zero e também fora do estator. A diferença entre estas distâncias mais o valor da folga dos dois mancais será a espessura de um elemento a ser colocado entre os mancais. Este procedimento é iterativo e muito trabalhoso. Caso a espessura do elemento fabricado fique menor do que o especificado, outro elemento deve ser feito;
 2. Montagem do rotor com uma rosca fina (figura 49-B). Com uma rosca fina na interface entre os mancais plano e o esférico, pode-se variar sua distância relativa, ajustando a folga. A maior limitação é a difícil fabricação desta rosca, que não pode ter folga nem ser muito pesada para não complicar o procedimento de montagem e possível posterior desmontagem do mancal; e
 3. Montagem do rotor com molas prato na interface e vários parafusos de fixação (figura 49-C). Neste caso, as molas prato fornecem a rigidez necessária à montagem e a distância entre os mancais é ajustada por parafusos dispostos radialmente em torno das molas prato e não um único parafuso.
-

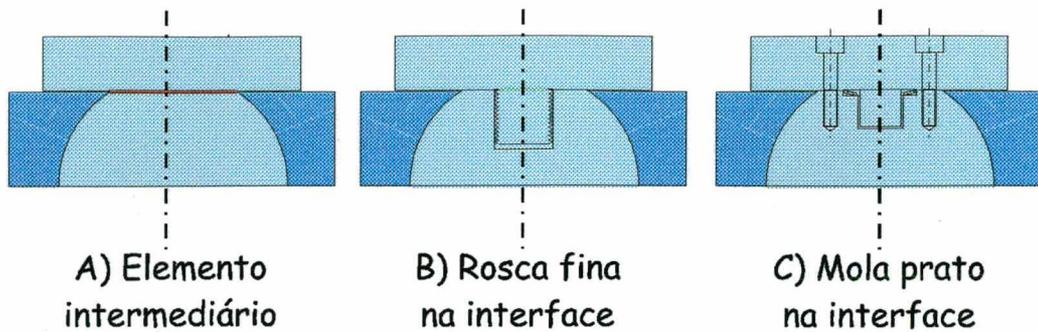


Figura 49 - Sistemas para obtenção da folga do mancal.

O sistema com molas prato é o mais fácil de ser fabricado e tem a vantagem da possibilidade de ajustes da inclinação de um mancal com relação ao outro. Apesar deste ajuste não interferir no funcionamento propriamente dito do mancal, permite que seja possível coincidir o eixo de rotação do rotor com o seu eixo geométrico, tornando-o balanceado.

As molas prato são arruelas cônicas projetadas para suportar carregamento axial. Cada elemento possui uma rigidez e uma capacidade de carga correspondente, conforme a DIN 2092 [38]. Quando se deseja ampliar estas características sem utilizar um outro tipo de mola, podem ser empregadas montagens em série ou em paralelo de um mesmo tipo de mola, conforme é descrito na DIN 2093 [39]. A montagem em série é empregada para multiplicar a força elástica do conjunto, proporcionalmente ao número de molas utilizado. Na montagem em paralelo, a força elástica é a mesma, mas multiplica-se o curso da mola também pelo número de molas utilizadas.

Através destas montagens, é possível garantir uma rigidez suficiente para uma boa operação do mancal.

5.2.5. DESENHOS DO MANCAL ROTATIVO

No anexo I deste trabalho, são apresentados os desenhos detalhados para a fabricação do mancal rotativo da mesa de retificação. Além deste, são apresentados os componentes do sistema de inclinação da mesa.

Nestes desenhos são especificadas as dimensões e tolerâncias de fabricação exigidas para todos os componentes a serem fabricados para a mesa.

5.3. PROJETO DA GUIA LINEAR AEROSTÁTICA

A guia linear aerostática que será empregada para a mesa de retificação é a mesma guia que equipa o carro transversal da máquina de ultraprecisão em desenvolvimento no LMP, conforme mostra a figura 50. Esta guia tem seu projeto baseado no trabalho desenvolvido por Stoeterau [2], e consiste em dois eixos cilíndricos sobre os quais correm mancais radiais aerostáticos onde será montada a mesa de retificação.

A guia da máquina é perfeita para a aplicação na mesa de retificação, pois possui dimensões e características operacionais ideais para a mesma. Se fosse projetada uma guia especificamente para a mesa de retificação, esta só diferiria da guia utilizada no curso do deslocamento da mesma, que seria menor. Mesmo possuindo mais curso do que o necessário, isto não interfere no desempenho da mesa de retificação.

É uma grande vantagem do trabalho poder utilizar um sistema já pronto e testado, pois o custo para o laboratório é reduzido e é evitado todo um trabalho de projeto, fabricação e qualificação de um novo mancal.

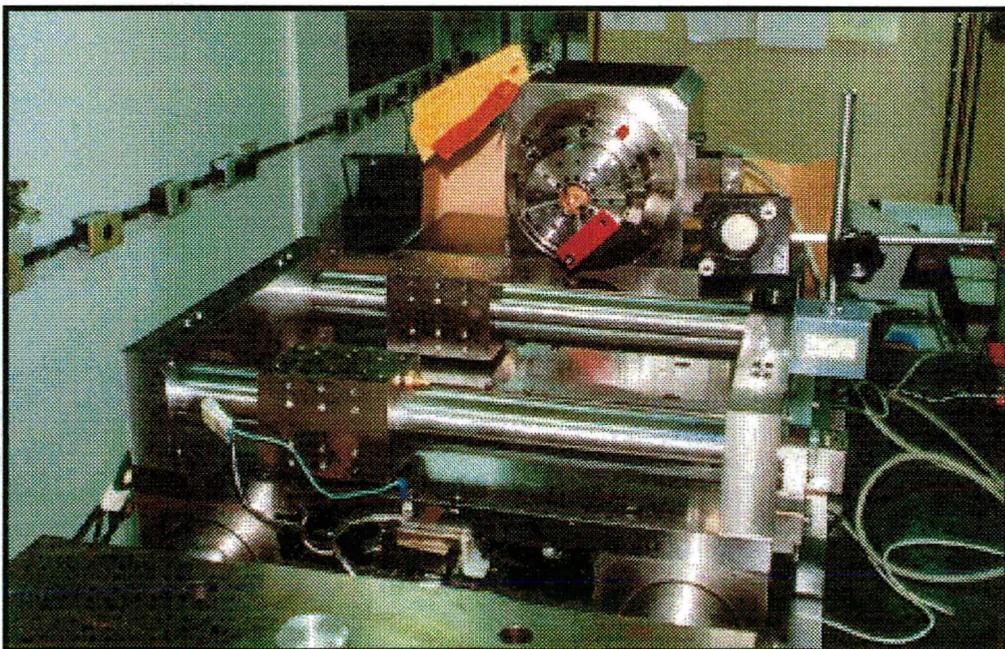


Figura 50 - Guia linear aerostática do carro transversal da máquina-ferramenta de ultraprecisão em desenvolvimento no LMP.

Esta guia linear aerostática possui as seguintes características [2]:

- 2 eixos paralelos com 40 mm de diâmetro;
- curso total de 200 mm;
- relação L/D dos mancais radiais de 1,5;
- mancais com três carreiras de alimentação de ar;
- 8 restritores por carreira;
- restritores de orifício sem rebaixo;
- diâmetro de 0,2 mm dos restritores;
- pressão de alimentação de ar de 6 bar; e
- folga de trabalho de 10 μm .

A mesma placa utilizada para unir os mancais radiais da guia será empregada como suporte para a mesa de retificação.

O carro transversal para a máquina-ferramenta de ultraprecisão é acionado através de um fuso de esferas recirculantes acoplado a um motor DC sem carcaça e sem escovas. Para a utilização na mesa de retificação, este acionamento pode ser manual diretamente no fuso de esferas ou com uma fonte independente para este motor.

5.4. PROJETO DO SISTEMA DE INCLINAÇÃO DA MESA

A inclinação da mesa será feita através de apoio sobre três pontos, com um dos pontos permitindo regulação de altura através de parafuso diferencial.

Quanto aos dois apoios fixos, estes podem ser rígidos ou rotulados. Os apoios rotulados não são muito recomendados para esta aplicação devido à baixa rigidez que apresentam. Se houver mudança na posição do apoio durante a usinagem, erros de forma serão transferidos para a peça.

Como o próprio nome diz, os apoios rígidos possuem uma rigidez alta, superior à do apoio móvel. Basicamente, consistem em fixar as duas partes da mesa que sofrerão inclinação com um componente que se deforme elasticamente e mantenha a rigidez da fixação. Este componente pode ser uma placa metálica fixada aos suportes da mesa, como pode-se observar nos desenhos dos componentes mostrados no anexo I.

O parafuso diferencial possuirá rosca interna com passo igual a 1 mm e rosca externa com

passo igual a 0,8 mm. Assim, para cada volta do parafuso, a mesa se desloca axialmente naquele ponto 0,2 mm. Como a distância entre o apoio móvel e os apoios fixos é de 150 mm (anexo I), cada volta do parafuso diferencial inclinará a mesa de retificação em 0,0764 graus.

Se for retificada uma sapata plana circular com diâmetro de 100 mm sobre a mesa de retificação, para cada volta do parafuso diferencial, haverá uma diferença de altura entre o centro e a extremidade da sapata de 0,067 mm. Isto equivale a $\pm 1 \mu\text{m} / 5^\circ$ de rotação no parafuso.

5.5. PROJETO DA PLACA DE FIXAÇÃO

A placa de fixação dever ser compacta, leve e de fácil fabricação ou aquisição.

O sistema escolhido para fixação das peças a serem retificadas sobre a mesa é baseado em dois rasgos tipo “T” defasados em 90° sobre a placa. Com a utilização de porcas “T” e apoios adequados, é possível fixar peças de diversas geometrias sobre a placa, desde que estas tenham uma dimensão menor do que a área de apoio da placa.

O procedimento de fixação da peça, quando esta necessita ser centrada, é iterativo e um pouco demorado, mas é o suficiente para a produção dentro do laboratório. Caso fosse necessária uma produção em maior escala, outro sistema de fixação deveria ser utilizado.

Estes rasgos poderiam ser fabricados diretamente sobre o lado plano do mancal rotativo, mas preferiu-se produzir uma peça separada. Caso houver a necessidade de outro tipo de fixação, faz-se uma nova placa, sem mudar o mancal plano.

No anexo I é apresentado um desenho detalhado da placa de fixação.

CAPÍTULO 6

FABRICAÇÃO E MONTAGEM DA MESA DE RETIFICAÇÃO

A genialidade aparece sempre que alguém se dá conta pela primeira vez de algo evidente.

Hermann Bahr (1863-1934).

6.1. INTRODUÇÃO

Com a etapa de projeto, foram escolhidos quais componentes poderiam ser utilizados de outros sistemas e quais deveriam ser fabricados. O desafio da etapa de fabricação é obter estes componentes nas tolerâncias especificadas que, como já foi visto, são muito apertadas e influenciam diretamente no desempenho da mesa de retificação.

De todos os sistemas, o que apresenta uma maior dificuldade de fabricação é o mancal rotativo aerostático.

A fabricação da mesa de retificação pode ser dividida em três fases distintas:

1. Usinagem dos componentes da mesa;
2. Moldagem dos mancais esférico e plano; e
3. Colocação dos restritores e ajustes de forma e de qualidade superficial dos mancais.

Após este trabalho, é necessário um controle geométrico das peças produzidas para garantir a qualidade do sistema. Feito este controle, passa-se para a montagem da mesa de retificação, também observando folgas e ajustes adequados.

6.2. USINAGEM DOS COMPONENTES

A usinagem dos componentes da mesa seguiu as especificações mostradas nos desenhos apresentados no anexo I.

Como este mancal é um protótipo e é suscetível a modificações, escolheu-se trabalhar com bronze. O bronze é um material de fácil usinagem que já apresentou bons resultados em

diversos dos mancais já produzidos no laboratório.

Os eixos da interface entre os mancais plano e esférico foram feitos de aço inox, para que não houvessem problemas de deformação das peças ou oxidação, o que poderia comprometer a operação do mancal.

Os próximos mancais fabricados no LMP devem ser confeccionados todos de aço inox para não haverem problemas de corrosão. O acabamento superficial das superfícies do mancal aerostático é suficiente para inibir a corrosão, o que justificaria a utilização de outros tipos de aço, mas ficaria muito caro dar este acabamento em todo o mancal. Então, é mais fácil partir-se de um material que não apresenta este problema, como é o caso do aço inoxidável.

Na figura 51 são apresentados os componente principais usinados nesta fase do trabalho.

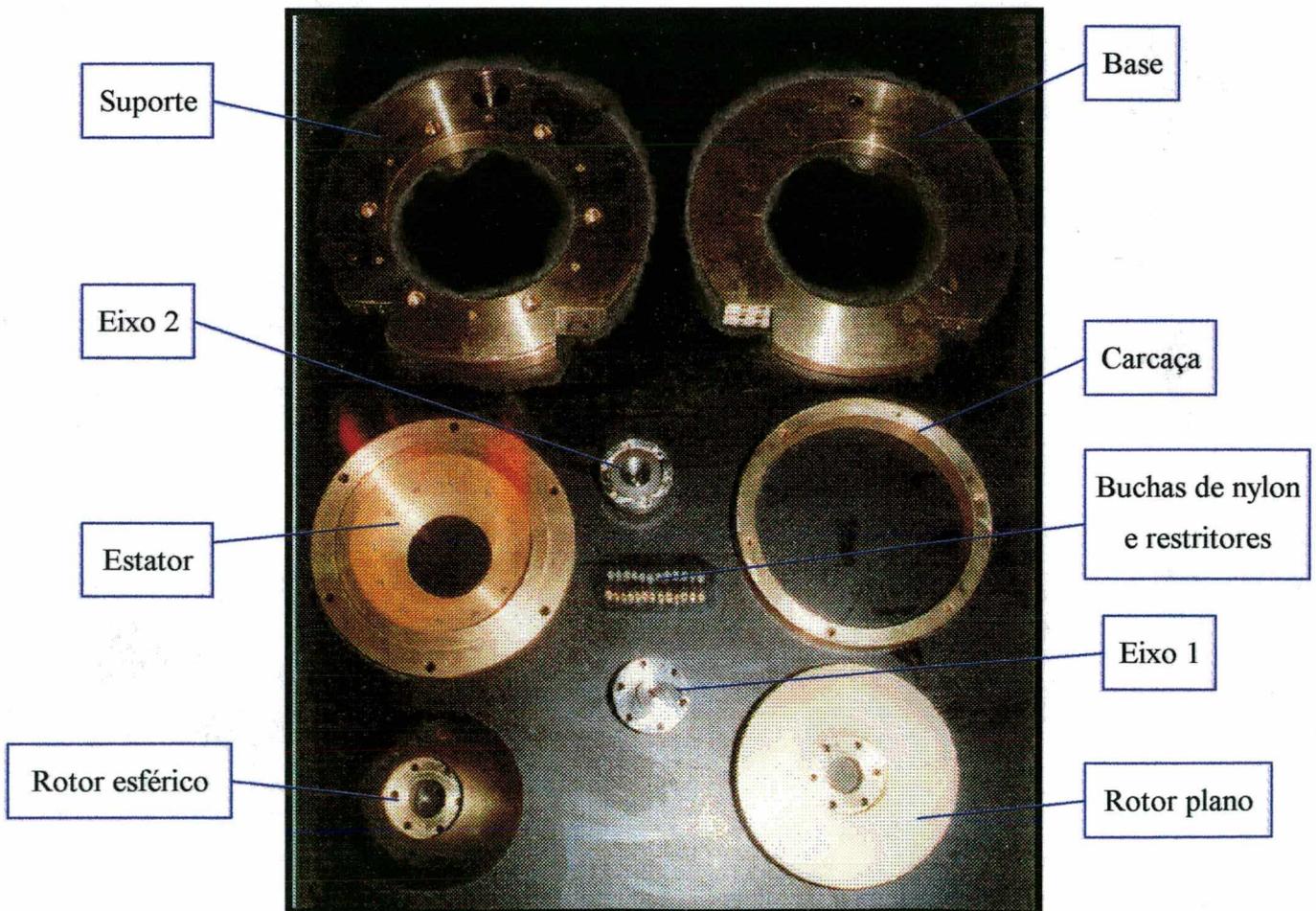


Figura 51 - Componentes usinados da mesa de retificação.

6.3. MOLDAGEM DOS MANCAIS

A moldagem compreende duas partes: a moldagem dos restritores e a moldagem dos mancais propriamente ditos.

A moldagem dos restritores segue o mesmo procedimento descrito por MULLER [5]. Neste padrão, são preparados bujões que servirão de insertos para os restritores dos mancais, nos quais são moldados furos no diâmetro da restrição. Esta moldagem consiste na preparação de um “varal” de fios de nylon com o diâmetro especificado que servirá de macho de moldagem para a obtenção dos furos nos bujões. Após seca a resina, retira-se o nylon e bujão estará pronto para ser colocado no mancal. A figura 52 mostra o “varal” utilizado.

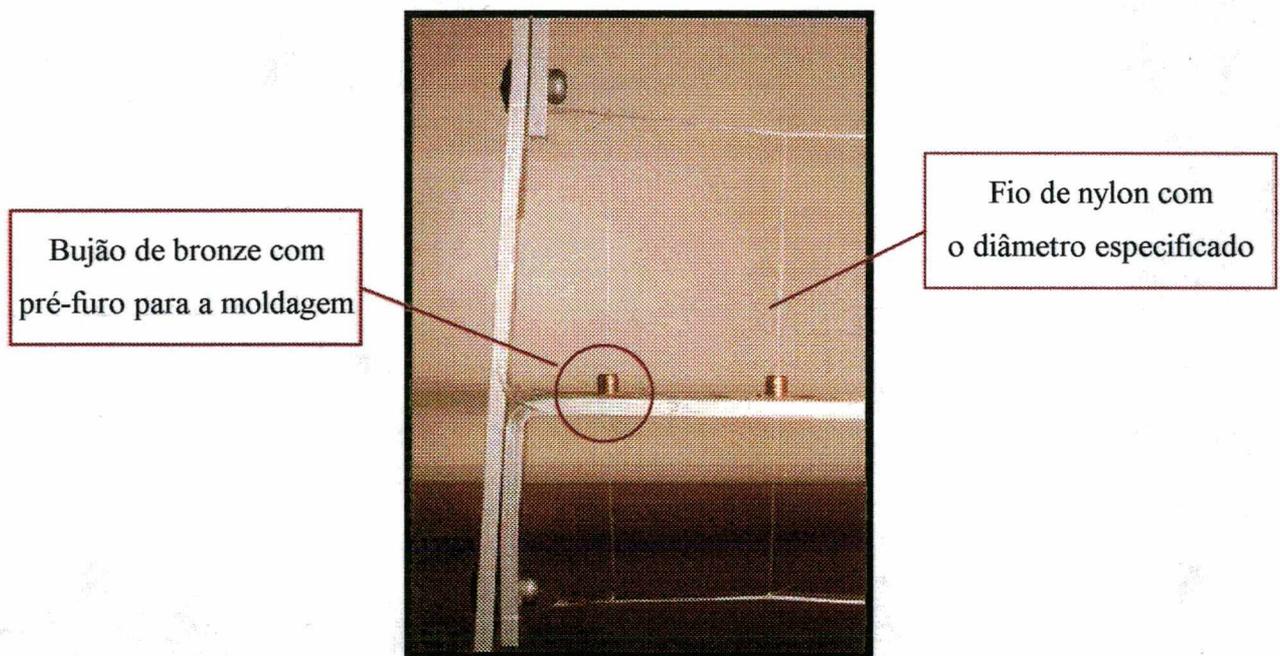


Figura 52 - Varal para moldagem dos bujões restritores.

A moldagem do mancal exige uma preparação prévia dos rotores plano e esférico que servirão de superfície de referência para o estator.

A idéia básica desse processo é a obtenção das melhores qualidades possíveis de forma e superficial na esfera e no plano. Quando esta forma for passada como “negativo” para a resina epoxi sobre o estator, permitirá que este estator já possua uma pré-forma também com qualidade.

Para garantir estes baixos erros nestes componentes, após usinados, os mesmos foram lapidados até a forma final. A lapidação foi feita com meio de lapidação composto por óleo fino MA-5 (70 % em volume) mais partículas dispersas de carboneto de silício com granulometria média de 3 μm (30 % em volume).

A lapidação destes componentes foi feito em equipamentos disponíveis no LMP. Na figura 53 é apresentada a lapidadora de esferas e, na figura 54, a lapidadora plana utilizadas.

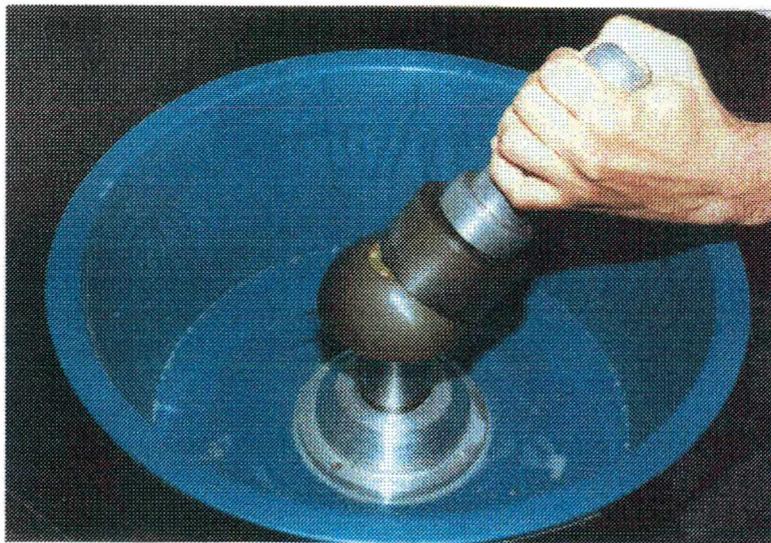


Figura 53 - Lapidadora de esferas.

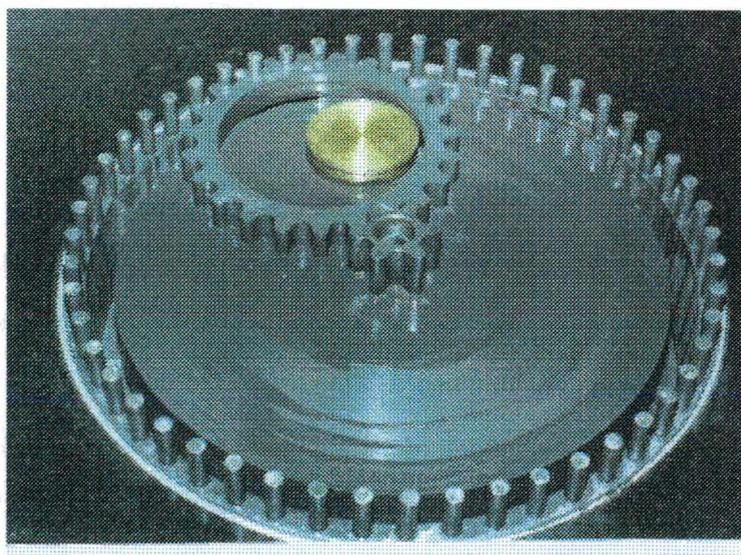


Figura 54 - Lapidadora plana.

Após a lapidação, as peças foram lavadas em ultra-som e receberam um último tratamento na superfície. Este tratamento consistiu na aplicação de uma camada muito fina e uniforme de cera para servir de desmoldante da resina epoxi. Sem esta camada de cera, seria muito difícil de separar as peças moldadas do estator, correndo-se o risco de danificá-las.

A resina utilizada é a Araldite® SW 404, com endurecedor HY 404. Esta resina é classificada como resina epoxi para ferramentaria, pois possui uma pequena contração aliada a uma boa resistência química, térmica e mecânica. Isto assegura a observância de rígidas tolerâncias dimensionais e estabilidade ao longo do tempo de uso. Além disso, essa resina é altamente adesiva e possui alta resistência à abrasão [40].

O procedimento de moldagem seguiu os seguintes passos:

1. Preparação da esfera e do rotor plano - Isolamento de orifícios e superfícies para que não houvesse aderência da resina, dificultando um posterior trabalho de limpeza;
2. Preparação do estator - Isolamento de orifícios, colocação dos insertos de nylon nas posições dos restritores e a colocação de uma restrição ao escorrimento da resina antes da cura;
3. Preparação da resina - Medição da proporção sugerida pelo fabricante de resina e endurecedor;
4. Aplicação da resina - Distribuição de um filme uniforme de resina sobre a superfície esférica do estator. Deve-se tomar muito cuidado para evitar a presença de bolhas de ar na resina;
5. Colocação da semi-esfera - Colocação da esfera com uma pressão suficiente para retirar o excesso de resina sem danificar a superfície da esfera. A esfera deve se apoiar sobre os insertos de nylon, mas sem sofrer qualquer tipo de deformação na região de contato;
6. Cura da resina - Espera por 24 horas até a resina estar totalmente endurecida;
7. Desmoldagem da esfera - Retirada da esfera por impacto, com cuidado para não danificá-la;
8. Rebarbação do estator - Retirada de todo excesso de resina do estator; e
9. Repetição dos passos 2 a 8 para o lado plano do mancal - O rotor plano deve ser colocado no estator para a moldagem com base na posição do rotor esférico, garantindo a coincidência do centro das duas peças.

Na figura 55 são mostrados os componentes momentos antes da moldagem. Pode-se reparar a presença dos insertos de nylon nas posições dos restritores.

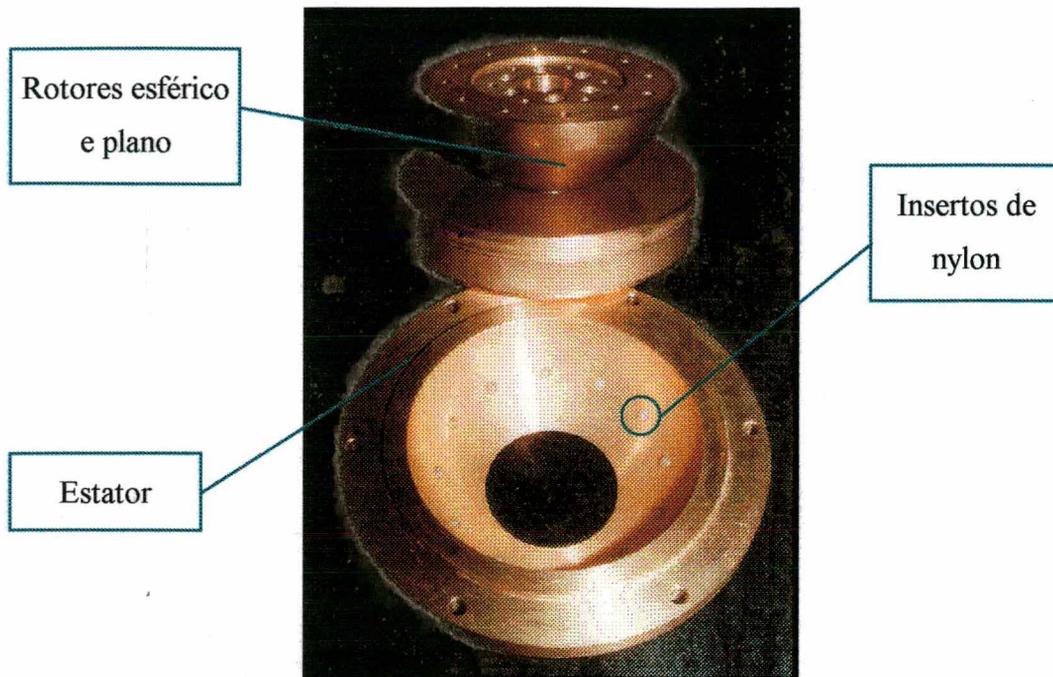


Figura 55 - Rotor e estator antes da moldagem.

6.4. COLOCAÇÃO DOS RESTRITORES E AJUSTES FINAIS NAS SUPERFÍCIES

A última etapa da fabricação do mancal consiste na colocação dos restritores e acabamento final nas superfícies do rotor e do estator.

A colocação dos restritores é feita de acordo com a seqüência mostrada na figura 56.

SEQÜÊNCIA PARA COLOCAÇÃO DOS RESTRITORES

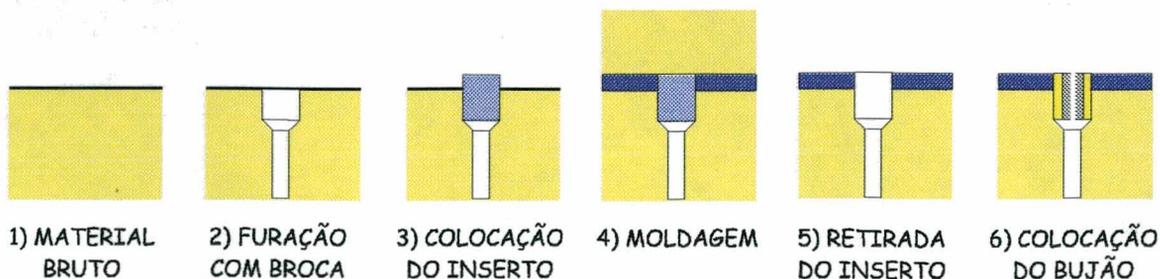


Figura 56 - Seqüência para colocação dos restritores.

Na fase de usinagem, são produzidos os canais de alimentação de ar e o alojamento dos bujões. Para evitar um entupimento dos orifícios dos bujões na moldagem, é colocado um inserto de nylon na posição de moldagem destes bujões.

Após a moldagem do mancal, na mesma máquina que fez os alojamentos dos bujões, usinam-se os insertos de nylon, retirando-os e deixando este alojamento pronto para receber o bujão com o orifício de restrição. Como acabamento, este bujão é colado no alojamento para evitar seu desprendimento e vazamentos de ar pelas laterais do mesmo.

Para finalizar a preparação do mancal, é necessário um ajuste final das superfícies do mesmo. Deve-se reduzir os erros de forma dos pares rotor / estator e equalizar a altura dos bujões dos restritores que, propositadamente, foram confeccionados para “sobrarem” no seu alojamento, devendo ser retirado este excesso. Se os bujões fossem menores, seriam formados rebaixos.

Para isso, recorre-se mais uma vez à lapidação. A lapidação esférica é feita diretamente com o rotor esférico contra o estator. Na parte plana, usa-se a lapidadora plana para o mancal e o também para o estator.

Após a lapidação, os componentes devem ser limpos em ultra-som para que sejam retirados todos os resíduos do processo, que são o óleo e as partículas abrasivas. Do ultrassom, os componentes devem ser lavados em água corrente para a retirada do desengraxante utilizado no equipamento. Por fim, os componentes recebem um jato de ar seco e limpo para retirar a água da lavação. Na figura 57 é apresentado o estator moldado, com os bujões e limpo.



Figura 57 - Estator moldado.

6.5. CONTROLE GEOMÉTRICO DOS COMPONENTES DA MESA DE RETIFICAÇÃO

Esta etapa compreende a verificação das medidas dos componentes da mesa, com sua posterior comparação com as medidas fornecidas no projeto.

De todos os componentes, os mais críticos são os rotores e o estator, dos quais depende a qualidade de operação da mesa de retificação.

A primeira etapa deste trabalho consistiu na otimização da montagem dos eixos nos mancais plano e esférico. Através desta montagem, procurou-se uma posição ótima entre os eixos e os rotores visando minimizar erros de centro e de perpendicularismo nestas montagens. Estas medições foram feitas utilizando-se o equipamento mostrado na figura 58.

Mesmo fazendo este controle, uma pequena parcela de erro de desalinhamento entre os eixos deverá ser compensada numa operação posterior. A vantagem é que como este erro é conhecido, pode facilmente ser compensado garantindo a qualidade da montagem.

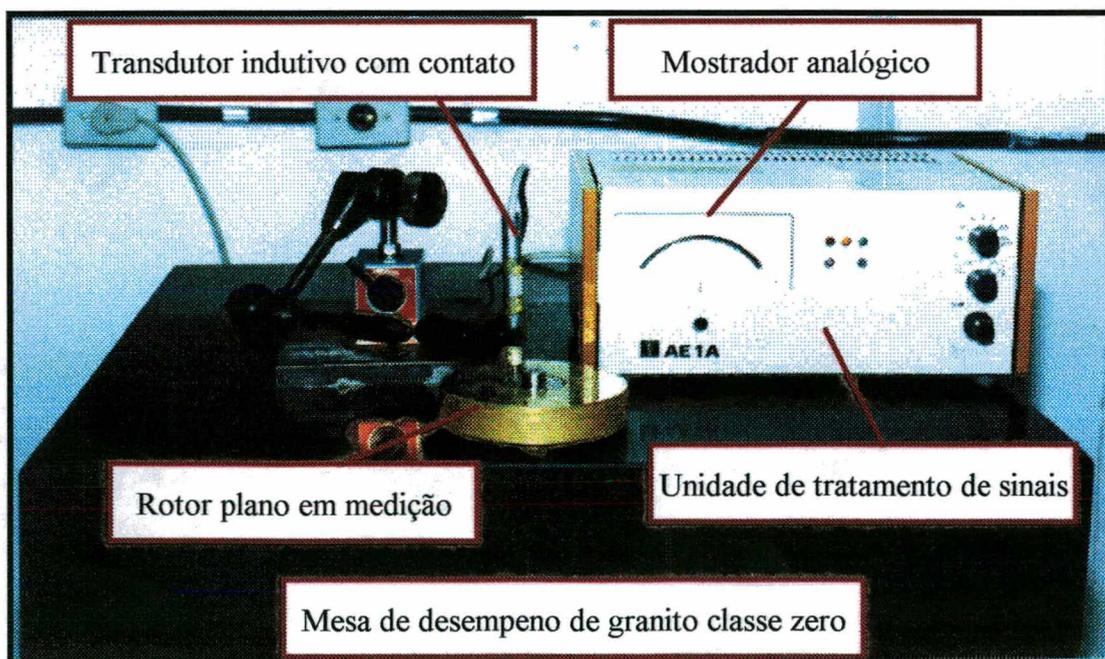


Figura 58 - Sistema de medição.

O sistema de medição é composto de um transdutor indutivo com contato tipo KS 4071 montado em uma base magnética de mecanismo hidráulico. A unidade de tratamento de sinais é do tipo KS AE1A e tem faixa de operação de ± 25 unidades de medição, com a faixa ótima de menor erro em ± 10 unidades de medição. Estas unidades podem ser reguladas para 20, 10, 5, 2, 1 e 0,5 μm , com o erro de medição dentro de uma divisão da escala utilizada.

A referência para as medições é dada pelo plano de uma mesa de desempenho feita em granito e com classe zero da empresa *Mitutoyo*.

A próxima etapa do controle geométrico consiste na medição do estator e dos rotores com seus respectivos eixos utilizando uma máquina de medir por coordenadas. A máquina utilizada é de fabricação da empresa *Zeiss* com sensibilidade de medição em torno de 1 μm .

Esta bateria de medições possuiu dois objetivos básicos:

1. Obter informações sobre os erros de forma das superfícies do mancal; e
2. Obter a condição de montagem dos eixos com relação aos seus mancais, para posterior encaixe dos eixos entre si na posição de menor erro.

As superfícies de interesse do mancal são: a esférica do rotor, a esférica do estator, o plano do estator e o plano do outro rotor.

No quadro 8 são apresentadas as medições feitas na superfície esférica do rotor.

| SUPERFÍCIE ESFÉRICA DO ROTOR | |
|--|---|
| Diâmetro: $\varnothing = 99,837 \pm 0,001 \text{ mm}$ | Esfericidade: Desvio-padrão = 0,3 μm Valor máximo = 0,6 μm Valor mínimo = - 0,7 μm Valor da incerteza = 1,3 μm |

Quadro 8 - Medição da forma da superfície esférica do rotor.

O diâmetro da esfera, apesar de ter sido dimensionado para ter 100 mm, sofreu um desgaste normal e esperado durante a lapidação.

Quanto à esfericidade, deve-se tomar muito cuidado com os valores máximos. Se os máximos são muito elevados, corre-se o risco de contato entre picos da esfera contra picos do estator, o que é totalmente indesejável. Os valores mínimos, apesar de também serem muito importantes, não preocupam muito com relação ao funcionamento do mancal pois não alterarão

de forma significativa as suas características. O desvio-padrão das medições feitas para a esfericidade do mancal se mostrou excelente e totalmente dentro do previsto para o processo de lapidação esférica. Desta forma, a esfericidade do mancal está dentro dos valores esperados.

No quadro 9, são apresentados os resultados das medições feitas na superfície esférica do estator.

| SUPERFÍCIE ESFÉRICA DO ESTATOR | |
|--|---|
| Diâmetro: $\varnothing = 99,864 \pm 0,001 \text{ mm}$ | Esfericidade: Desvio-padrão = $0,7 \mu\text{m}$ Valor máximo = $1,1 \mu\text{m}$ Valor mínimo = $- 2,6 \mu\text{m}$ Valor da incerteza = $3,7 \mu\text{m}$ |

Quadro 9 - Medição de forma da superfície esférica do estator.

O diâmetro da esfera no estator já era esperado como sendo maior do que o rotor devido ao processo de lapidação após a moldagem. Neste processo, a esfera do rotor é lapidada contra o estator reduzindo a dimensão do rotor.

Para os mancais esféricos, a sua folga nominal é definida exclusivamente pela diferença de diâmetros entre as esferas do rotor e do estator. A variável empregada para a montagem do mesmo é a excentricidade relativa, que mede a posição do rotor com relação ao estator pela seguinte equação:

$$E = \frac{e}{c} \quad (2)$$

onde:

E - excentricidade relativa;

e - diferença de posição entre os centros da rotor e do estator; e

c - folga nominal ou diferença de diâmetro entre rotor e estator.

Desta forma, pode-se encontrar três situações distintas na montagem do mancal, como mostra a figura 59. Se for feita uma análise comparativa com mancais planos, pode-se deduzir as mesmas conclusões apresentadas por Rehsteiner [11], figura 13, no que diz respeito à distribuição da folga na superfície do mancal.

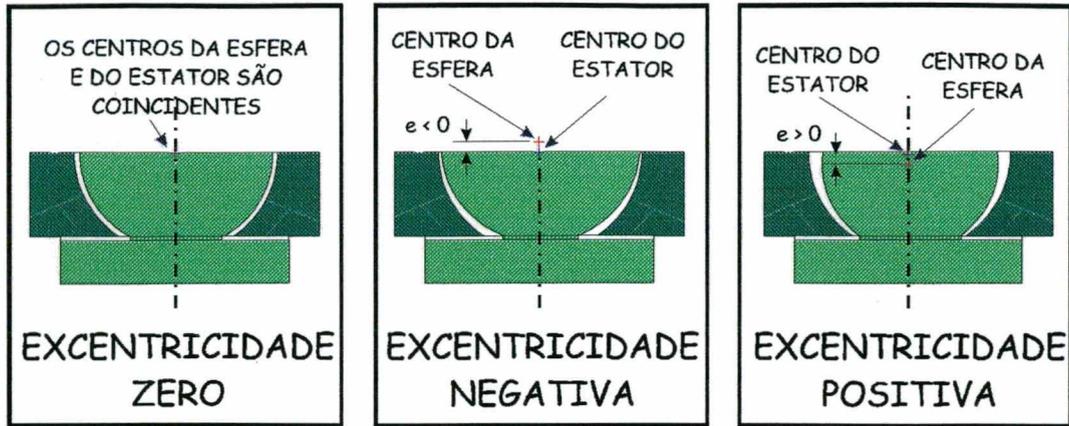


Figura 59 - Condição da folga em um mancal esférico devido à excentricidade.

No caso do mancal da mesa de retificação, uma diferença de diâmetros de 27 μm tornará inviável a operação do mesmo com excentricidade negativa, já que a folga relativa de trabalho para este mancal está prevista para aproximadamente 12 μm .

Apesar desta condição não ser a ideal para o mancal esférico, não chega a ser preocupante devido ao esforço de trabalho estar sobre o mancal plano.

No quadro 10 são mostradas as medições de forma feitas na superfície plana do rotor.

| SUPERFÍCIE PLANA DO ROTOR | |
|---------------------------|---|
| Paralelismo: | Planicidade: |
| Desvio X/Z: 0,0102° | Desvio-padrão = 1,5 μm |
| Desvio Y/Z: 0,0069° | Valor máximo = 2,0 μm Valor mínimo = - 6,5 μm |
| | Valor da incerteza = 8,5 μm |

Quadro 10 - Medição de forma da superfície plana do rotor.

O valor elevado na planicidade está além do esperado, mas pode-se notar que o desvio mais significativo é para valores negativos. Apesar do valor absoluto de planicidade estar em 8,5 μm , o desvio-padrão de 1,5 μm é considerado bom. Se o valor de ponto máximo fosse muito elevado, seria prejudicial ao mancal, já que existiria o risco de contato entre picos do rotor e do estator, com possível colapso do mesmo. Os desvios de paralelismo entre as faces do mancal plano podem ser corrigidos após a montagem com um retrabalho na superfície externa do mesmo.

No quadro 11 são mostradas as medições de forma feitas na superfície plana do estator.

SUPERFÍCIE PLANA DO ESTATOR

Planicidade:

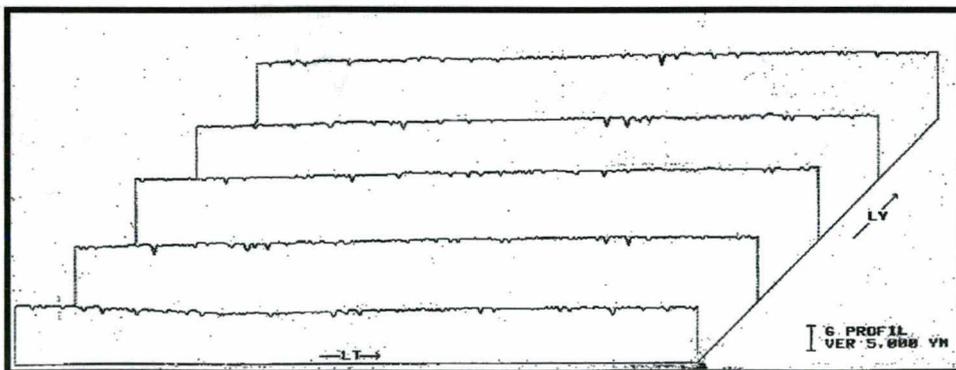
Desvio-padrão = $0,4 \mu\text{m}$ Valor máximo = $1,1 \mu\text{m}$ Valor mínimo = $-1,1 \mu\text{m}$ Valor da incerteza = $2,2 \mu\text{m}$ **Quadro 11** - Medição de forma da superfície plana do estator.

Os valores para o plano do estator são considerados ótimos. Conforme a figura 26, existe uma recomendação para os erros de forma de mancais planos estarem com um limite de 25% do valor da folga nominal de trabalho. Desta forma, mesmo tendo erros maiores no rotor, sua soma com os erros do estator resulta em um valor aceitável para a operação do mancal.

Para finalizar a qualificação das superfícies, foi medida a sua rugosidade. A medição de rugosidade nas superfícies esféricas é bem mais difícil do que nas superfícies planas. Como foram usados os mesmos processos de acabamento para todas as superfícies, decidiu-se por medir as superfícies planas, extrapolando os resultados para as superfícies esféricas.

Na figura 60 é mostrado o perfil de rugosidade obtido no rotor plano. Foram feitas baterias de cinco medições em três regiões diferentes da superfície do rotor, de forma a obter-se uma condição bastante aleatória para os resultados.

A rugosidade R_a , para um *cut-off* de $0,8 \text{ mm}$, se situou em torno de $0,22 \mu\text{m}$, e a rugosidade R_z em $2,90 \mu\text{m}$.

**Figura 60** - Perfil de rugosidade do rotor plano.

Da mesma forma utilizada para a medição do rotor, foi feita a medição de rugosidade no estator. Na figura 61 é apresentado um dos perfis obtidos.

Para o estator, com um mesmo *cut-off* de 0,8 mm, obteve-se Ra de 0,35 μ m e Rz de 4,5 μ m.

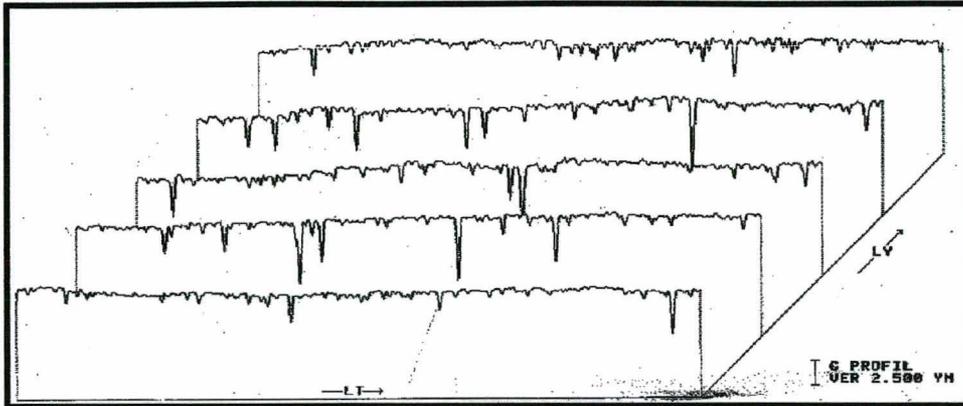


Figura 61 - Perfil de rugosidade do estator plano.

Como se pode observar na figura 61, existem muitos vales profundos na superfície. Isso ocorre devido à presença de poros na resina do estator, o que já era esperado.

Um outro detalhe que deve ser observado é que a escala vertical dos perfis de rugosidade das figuras 60 e 61 é diferente, como mostra a legenda no canto inferior direito das figuras.

Na última etapa das medições, foi encontrada a posição de mínimo erro de alinhamento entre os eixos dos rotores para a montagem final do conjunto. Esta posição de mínimo erro reduz bastante o trabalho de ajuste final na montagem do mancal.

O desalinhamento final dos eixos possui um valor muito baixo, sem qualquer prejuízo para o correto funcionamento do mancal aerostático.

6.6. MONTAGEM DA MESA DE RETIFICAÇÃO

Da mesma forma que no controle geométrico, os componentes que apresentam maior dificuldade para a montagem são os rotores e o estator do mancal rotativo. Os demais componentes são de fácil montagem e não apresentam problemas funcionais com a presença de pequenos erros de montagem.

As guias lineares já estão montadas e ajustadas sem a necessidade de qualquer trabalho

adicional.

A maior dificuldade é a obtenção da folga do mancal rotativo, garantindo a coincidência entre o eixo de rotação do rotor e o eixo de centro geométrico do estator. Caso isso não seja possível, o rotor irá orbitar em torno do eixo geométrico do estator causando um desbalanceamento residual no conjunto, prejudicial ao seu correto funcionamento.

Na figura 62 é apresentado o conjunto antes da montagem.

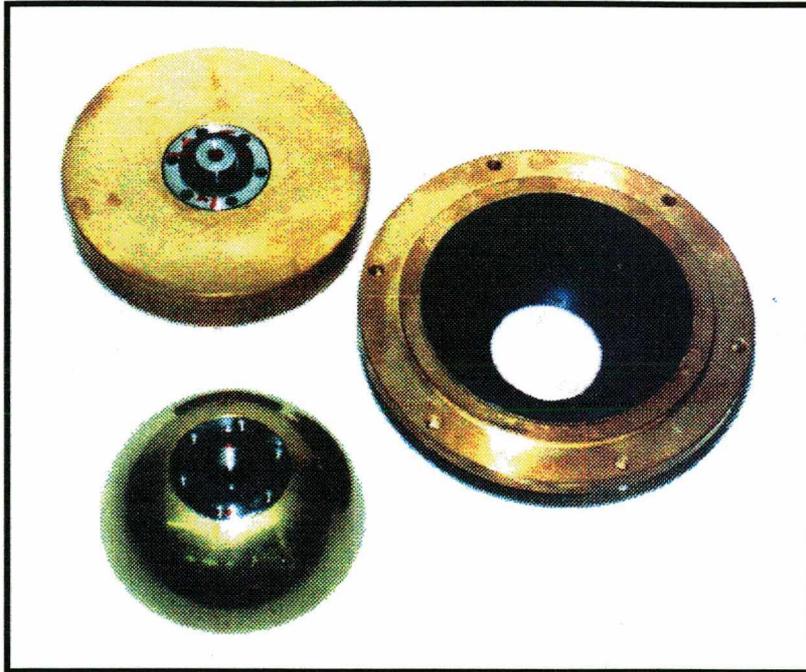


Figura 62 - Conjunto do mancal rotativo antes da montagem.

A montagem do mancal deve ser feita com alimentação de ar a baixa pressão (até 2 bar). Isto é necessário para que as superfícies do rotor e do estator não se toquem, evitando possíveis arranhões ou marcas nestas superfícies.

O controle da folga de montagem do mancal é feito com o mesmo sistema de medição mostrado na figura 58. Basicamente, este controle consiste na medição do deslocamento axial sofrido pelo rotor do mancal quando lhe é retirada a alimentação de ar. Neste momento, o rotor “assenta” sobre o estator caracterizando uma posição de folga zero. Com o ar ligado, o efeito aerostático separa as duas superfícies até a distância permitida pela montagem do rotor. Esta distância máxima é a folga de montagem do mancal. Um esquema deste controle da folga é mostrado na figura 63.

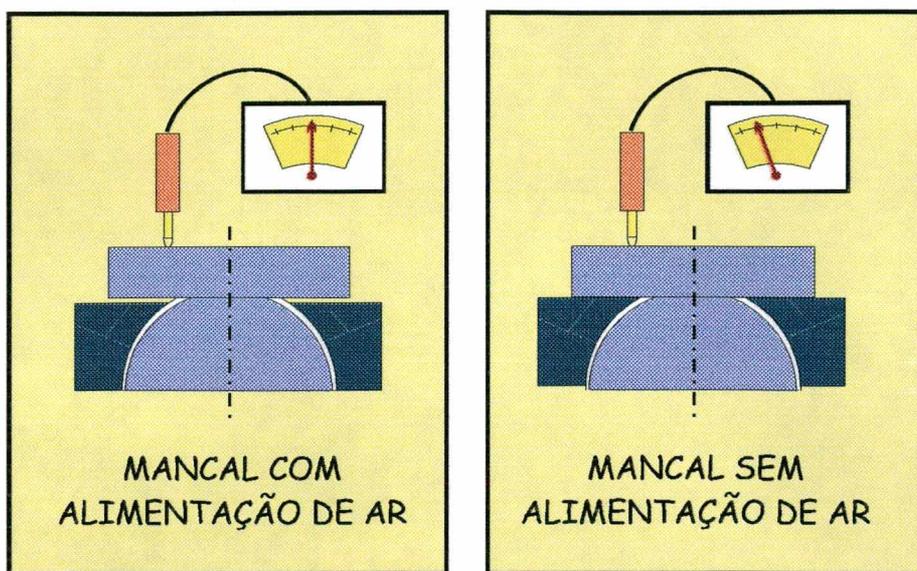


Figura 63 - Controle da folga de montagem do mancal rotativo.

Em paralelo a este controle da folga, deve ser feito o controle do batimento do mancal. Este batimento definirá quanto desbalanceamento o mancal possuirá após a montagem.

Desta forma, a montagem consiste em um processo iterativo que busca otimizar a condição de folga ótima de montagem associada a um baixo erro de batimento radial. Esta etapa é considerada a mais difícil de toda a montagem. Um desenho esquemático deste controle para a montagem é apresentado na figura 64.

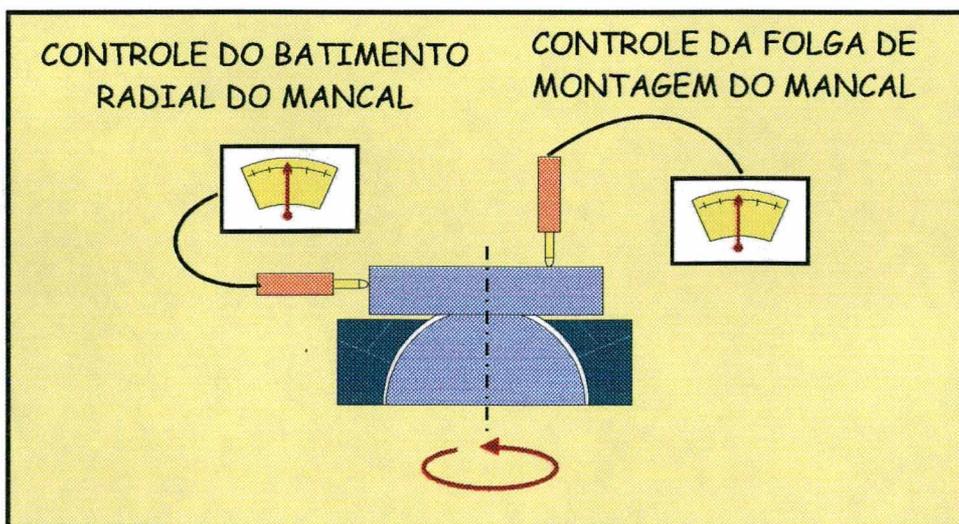


Figura 64 - Controle geométrico na montagem.

Finalizada a montagem do mancal, parte-se para o acerto das superfícies externas dos rotores plano e esférico, buscando torná-las paralelas entre si e perpendiculares ao eixo de rotação do mancal. Isto é feito para possibilitar a montagem da placa de fixação dos corpos de prova.

Esta usinagem de acerto é feita por retificação direta sobre as superfícies do mancal, com este operando como mesa de retificação, mas com o movimento radial fornecido pela própria máquina. Por se tratar de retificação sobre bronze, alguns cuidados devem ser tomados durante o processo para evitar o empastamento do rebolo, como a utilização de pequenas profundidades de corte.

Montada a placa de fixação, esta também é retificada sobre o mancal para gerar uma superfície de referência para o posicionamento dos corpos de prova.

A figura 65 mostra a mesa de retificação montada sobre uma mesa de granito somente para demonstração dos seus movimentos, fora da máquina-ferramenta.

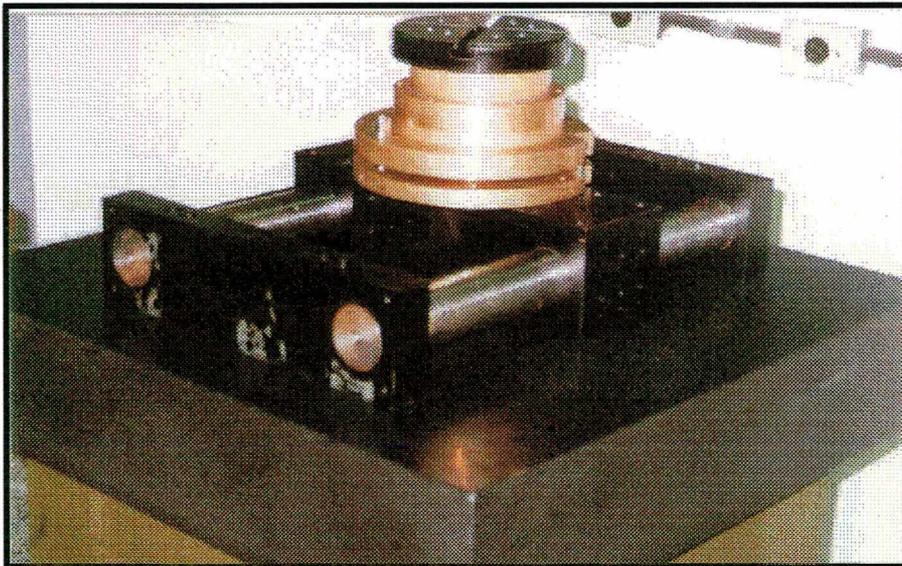


Figura 65 - Mesa de retificação montada.

Terminada a montagem da mesa, deve-se partir para a sua qualificação através de diversos ensaios, incluindo os primeiros testes de usinagem. Para a realização destes ensaios, recomenda-se a aplicação de diversos procedimentos de segurança para evitar danos ao mancal aerostático. Estes procedimentos possuem base nas recomendações descritas no manual de operação de um mancal aerostático da empresa *Professional Instruments* [41].

CAPÍTULO 7

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Duvide sempre de você mesmo, até que os dados não deixem lugar a dúvidas.

Louis Pasteur (1822-1895).

7.1. INTRODUÇÃO

A qualidade dimensional e superficial de uma peça usinada depende da qualidade dos movimentos realizados pela máquina-ferramenta durante a sua usinagem.

Os erros de usinagem causados pela máquina-ferramenta são devidos a movimentos relativos não intencionais entre a ferramenta e a peça, que se refletem como rugosidade, erros de forma e dimensionais independentes de sua dinâmica de usinagem e sua direção.

Na mesa de retificação, a qualidade da peça usinada possui uma alta dependência da qualidade do mancal aerostático empregado.

Uma propriedade essencial para este mancal é a sua capacidade de manter a sua posição relativa a um sistema fixo de coordenadas espacial, independente do carregamento devido à velocidade, força de usinagem, vibrações, influências térmicas, etc. Um mancal com capacidade de manter sua posição espacial inalterada sob variação de carregamento não existe. Sua variação de posição com relação ao carregamento aplicado depende de suas propriedades estáticas, dinâmicas, geométricas e térmicas [29].

Para determinar algumas destas propriedades e dependências, serão feitos alguns ensaios divididos em três etapas:

- Ensaios estáticos;
- Ensaios dinâmicos; e
- Ensaios de usinagem.

Não há a necessidade da realização de ensaios térmicos por não haverem fontes de calor significativas na mesa de retificação capazes de alterar suas características operacionais.

7.2. ENSAIO ESTÁTICO

O ensaio estático tem como objetivo a obtenção da curva de capacidade de carga que, quando derivada, fornece a curva de rigidez do mancal em função da sua excentricidade relativa. Através destas curvas, é possível determinar qual é a folga de trabalho e qual é a rigidez do mancal em cada condição de carregamento imposto ao mesmo. Desta forma, pode-se estipular um carregamento máximo para o mancal sem colocar seu funcionamento em risco.

Uma outra vantagem destas informações é que, a partir delas, pode-se induzir um pré-carregamento no mancal fazendo com que o mesmo opere dentro de uma faixa de rigidez ótima, o que significa uma menor variação da sua posição espacial com relação ao carregamento imposto.

Basicamente, o ensaio consiste na aplicação de um carregamento gradual e conhecido sobre a face plana do mancal, que é a direção na qual se pretende obter suas características, monitorando o comportamento da sua folga até as superfícies do mancal se encostarem.

A montagem do ensaio foi feita como mostra a figura 66.

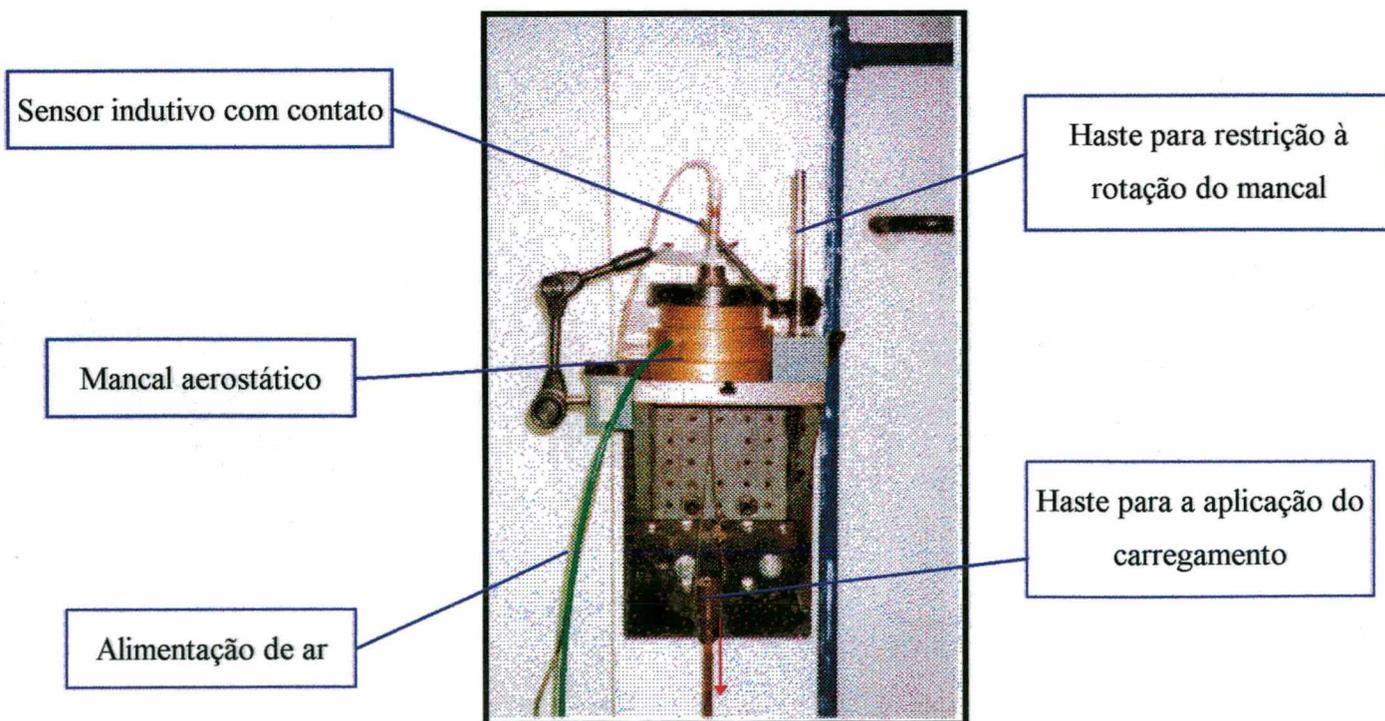


Figura 66 - Montagem do ensaio estático.

Como pode ser observado na figura 66, o mancal aerostático devidamente alimentado com ar seco e limpo e na pressão de trabalho (6 bar), é solicitado axialmente através de uma haste sobre a qual são colocadas as massas padrão. Sobre o mancal, é posicionado o sensor de deslocamento que monitora a variação de folga do mancal durante o ensaio.

Este sistema de medição é o mesmo apresentado na figura 58.

Como a folga do mancal é muito pequena, deve-se manter o sistema de medição isento de qualquer perturbação externa. Para auxiliar na manutenção da posição do mancal durante o ensaio, foi colocada uma haste para restringir a rotação do mesmo. Qualquer variação na posição do mancal se reflete diretamente em um erro na medição da folga do mancal.

Terminada a montagem do ensaio, procedeu-se a medição da folga do mancal seguindo o padrão mostrado na figura 63. A partir desta folga, o sistema de medição foi ajustado para que a faixa de medição a ser empregada fosse posicionada dentro da faixa ótima recomendada pelo fabricante do equipamento, além de permitir a maior sensibilidade possível do sistema (0,5 μm /divisão da escala).

Para evitar problemas com a histerese no início das medições, o mancal foi previamente carregado por uma força aplicada manualmente e posteriormente descarregado desta força. Observou-se que a posição da folga do mancal após este procedimento alterou-se significativamente, caracterizando a histerese no sistema. O procedimento foi repetido por algumas vezes para que esta nova posição de “equilíbrio” fosse certificada.

Esta histerese é justificável se for observado o desenho do estator do mancal da mesa no anexo I. Por este desenho, pode-se observar a posição dos restritores de alimentação de ar nas superfícies plana e esférica. Enquanto na superfície plana os restritores são posicionados paralelamente à direção axial do carregamento principal do mancal, na superfície esférica esta posição é desviada em um ângulo de 53° da direção axial do mancal. Isto faz com que a “sustentação aerostática” na direção axial seja muito maior no plano do que no lado esférico. Assim, como o peso do rotor é baixo, no momento em que há a injeção de ar no mancal, este vai para uma posição de equilíbrio com uma folga no lado plano maior do que no lado esférico. Esta folga “grande” oferece pouca capacidade de carga ao mancal, com uma rigidez ainda mais baixa, o que permite a alteração da posição de equilíbrio com pequenos carregamentos, como é o caso

do carregamento manual imposto.

O ensaio desenvolveu-se com a aplicação gradual de carregamento de 5 em 5 kg, até que a folga do mancal fosse reduzida ao valor mínimo, sendo repetido por três vezes. Na figura 67 é mostrado o gráfico de capacidade de carga do mancal com relação à sua excentricidade relativa. Este gráfico é uma média das três medições realizadas e possui os valores transformados em N.

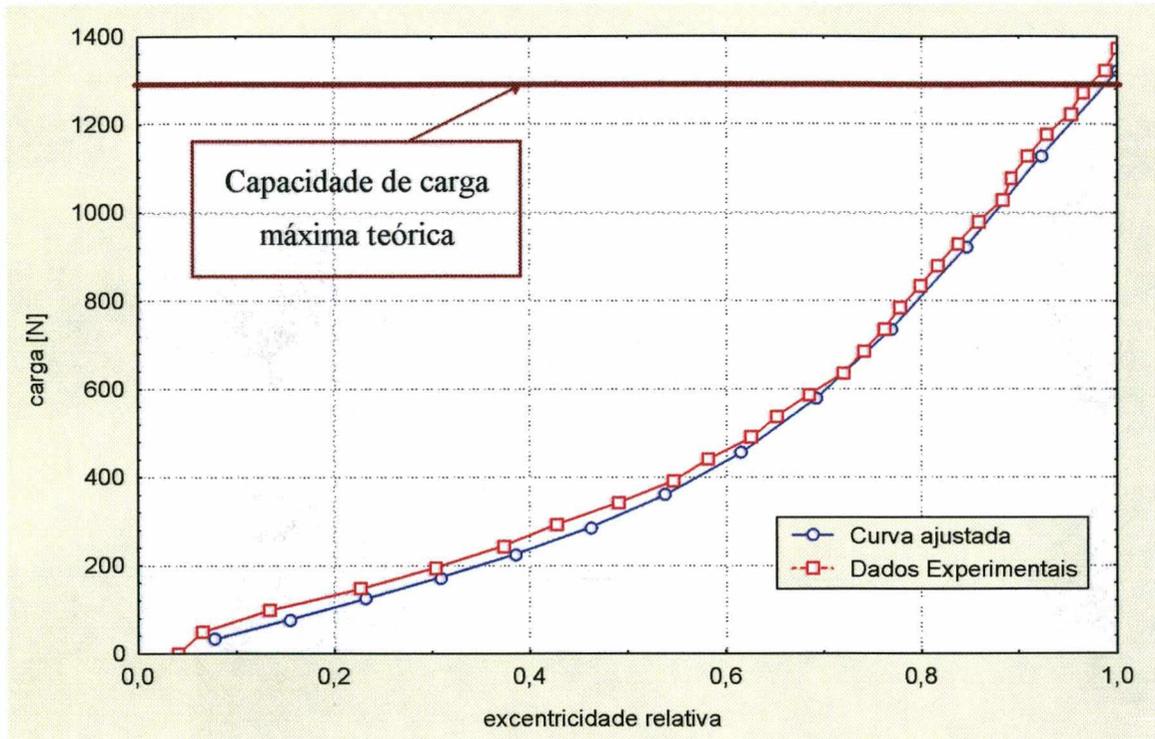


Figura 67 - Curva de capacidade de carga axial do mancal aerostático.

Como pode ser observado na figura, a capacidade máxima de carga calculada, mostrada no quadro 7, foi perfeitamente atingida. A histerese fica caracterizada pelo início da curva de carregamento em uma excentricidade relativa diferente de zero para carregamento nulo.

A curva ajustada foi obtida pelo método dos mínimos quadrados com ajuste polinomial de sexta ordem.

Com a derivação da curva ajustada de capacidade de carga, obtém-se a curva de rigidez axial do mancal com relação à sua excentricidade relativa. Na figura 68 é apresentada esta curva, que possui a forma polinomial de quinta ordem.

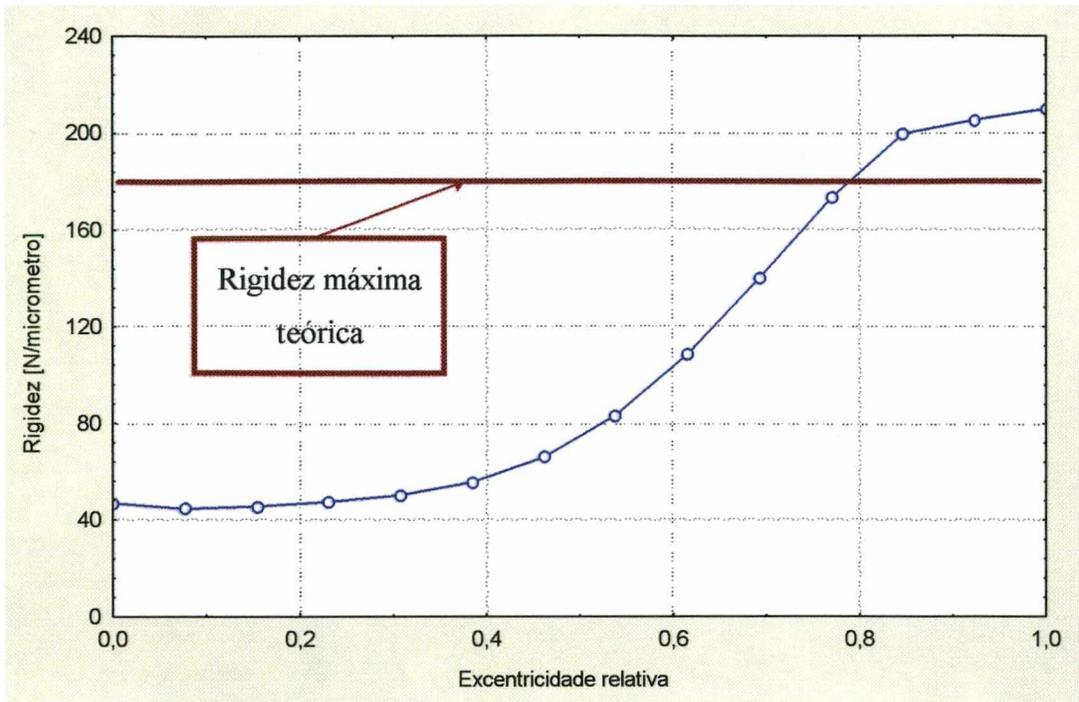


Figura 68 - Curva de rigidez axial do mancal aerostático.

Da mesma forma que a capacidade de carga, a rigidez máxima teórica também foi atingida. Deve-se tomar cuidado com a região de operação do mancal em termos de excentricidade relativa. Apesar da rigidez máxima possuir um valor bastante satisfatório, se o mancal for operar na faixa de mínima rigidez da curva, não apresentará resultados finais de usinagem otimizados.

7.3. ENSAIO DINÂMICO

Um mancal com boas características estáticas não é necessariamente um mancal com boas características dinâmicas.

O comportamento dinâmico das forças de usinagem influenciam diretamente na eficiência do mancal. Quando estas forças excitam a frequência natural do mancal, ocorrem deslocamentos muito significativos na posição de equilíbrio do mancal, prejudicando o resultado final da usinagem e podendo até levar o mancal a um colapso. Isto ocorre devido ao baixo amortecimento

do mancal quando opera na frequência natural.

Com o ensaio dinâmico, pretende-se obter estas frequências críticas do mancal e concluir sobre a sua segurança de operação. O tipo de ensaio utilizado é baseado no método do impacto, onde uma excitação externa pontual é fornecida ao sistema, monitorando-se sua resposta a esta excitação. Quando os dados de excitação e resposta são cruzados no domínio da frequência, resulta em um gráfico do tipo mostrado na figura 69, que indica as frequências de ressonância do sistema ensaiado.

Este tipo de ensaio deve ser feito com acompanhamento de profissionais da área, devido ao grande número de parâmetros e considerações que devem ser feitas para que os resultados obtidos sejam confiáveis.

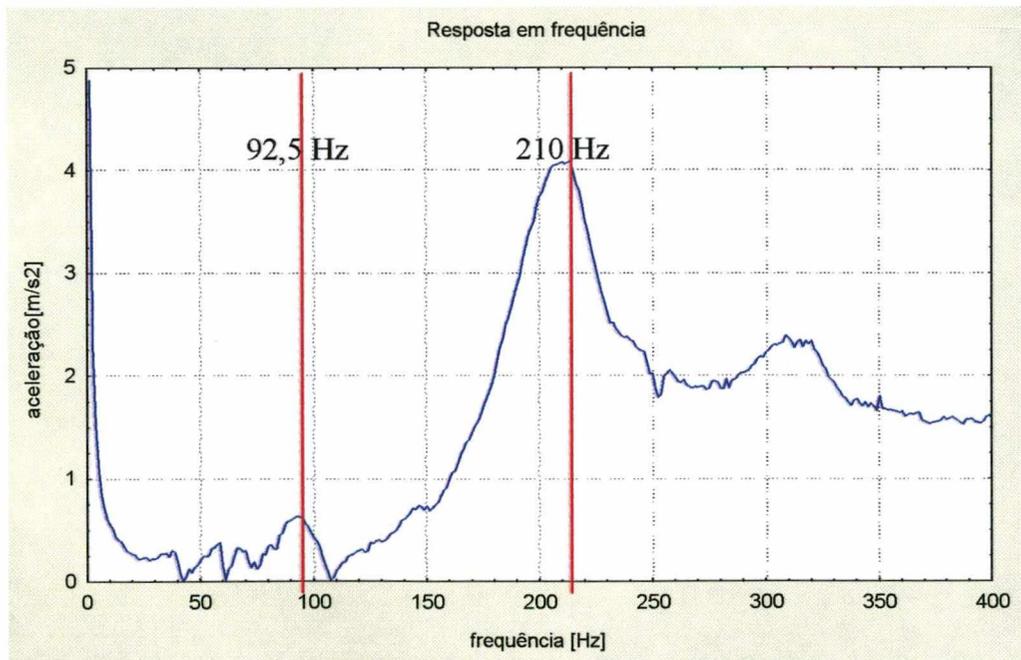


Figura 69 - Resposta em frequência do mancal aerostático na direção axial.

A mesa de retificação não foi desenvolvida para trabalhar com altas velocidades de rotação, não exigindo cuidados neste sentido quanto às suas frequências naturais. A frequência de 92,5 Hz não é atingida pela mesa de retificação em rotação.

A maior preocupação é quanto ao cabeçote da retificadora, que pode excitar o mancal em

outras faixas de frequência. Por exemplo, a frequência da rede elétrica (60 Hz), que alimenta o motor do cabeçote da máquina, deve estar longe da primeira frequência natural do mancal, que é de 92,5 Hz. O fato de que a primeira frequência natural do mancal seja maior do que a da rede é uma vantagem. Isto ocorre porque quando o motor do cabeçote é acelerado, varre todas as frequências até que se estabilize, não passando pela frequência crítica do mancal.

A frequência de 210 Hz não será atingida durante a operação normal da mesa de retificação.

Como conclusão final do ensaio, o mancal terá uma operação segura com relação às suas características dinâmicas.

7.4. ENSAIOS DE USINAGEM

A avaliação final da qualidade da mesa de retificação deve ser feita observando-se a qualidade da execução da retificação das sapatas planas circulares com conicidade controlada.

Para se ter um parâmetro de comparação de usinagem com a mesa de retificação, foram programadas três baterias de ensaios com montagens distintas:

1. Ensaio de retificação do corpo de prova sobre a mesa magnética da retificadora em condições convencionais de operação;
2. Ensaio de retificação do corpo de prova sobre a mesa de retificação utilizando o avanço radial dado pelo carro transversal da máquina-ferramenta; e
3. Ensaio de retificação do corpo de prova sobre a mesa de retificação e sobre as guias aerostáticas.

Através destas variações pode-se avaliar a influência da utilização da mesa de retificação na qualidade superficial do corpo de prova, comparando-se as superfícies usinadas com e sem a mesa. Além disso, pode-se também avaliar a influência das guias lineares aerostáticas no processo.

Ao final de cada ensaio, foram feitas medições de rugosidade e erros de forma para posterior comparação. O equipamento utilizado para as medições de rugosidade foi o “surf test” da Mitutoyo, mostrado na figura 70. Para a medição dos erros de forma, foi utilizado o equipamento já apresentado na figura 58.

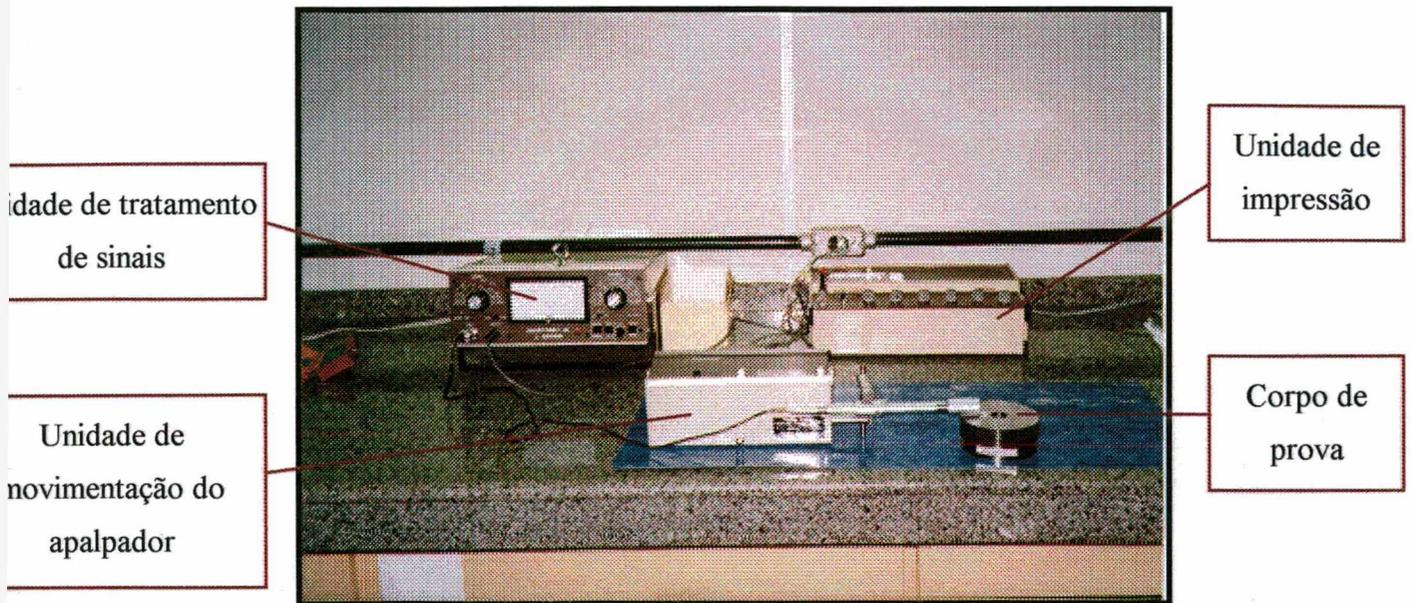


Figura 70 - Rugosímetro.

A medição de rugosidade foi feita junto ao Laboratório de Metrologia da Escola Técnica Federal de Santa Catarina. Com este rugosímetro, é possível a obtenção dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t .

Teoricamente, a utilização de somente estes dois parâmetros não é suficiente para a correta caracterização de uma superfície. Como o objetivo destas medições é uma análise comparativa entre variações de um mesmo processo de usinagem, é possível fazer esta comparação através destes parâmetros.

7.4.1. CONDIÇÕES INICIAIS DO PROCESSO

Através de ensaios preliminares com e sem a mesa de retificação, constatou-se a necessidade de um ajuste inicial na máquina antes dos ensaios.

O primeiro ponto observado diz respeito à frequência de alimentação da rede elétrica. A máquina, por ser importada, possui todos os seus motores dimensionados para operarem em uma frequência de rede de 50 Hz. Como a rede local é de 60 Hz, esta sobrecarga de 20 % sobre os motores impõe um nível de vibrações no cabeçote acima do limite aceitável, o que resultou em

uma má qualidade superficial das peças usinadas, principalmente quando se utilizou a mesa de retificação.

Para contornar este problema, foi instalado na máquina um variador de frequência da marca Danfos, modelo VLT 3000, figura 71, que permitiu o ajuste da frequência de alimentação dentro dos 50 Hz especificados para a máquina. Após esta modificação, houve um ganho sensível na qualidade das peças usinadas.

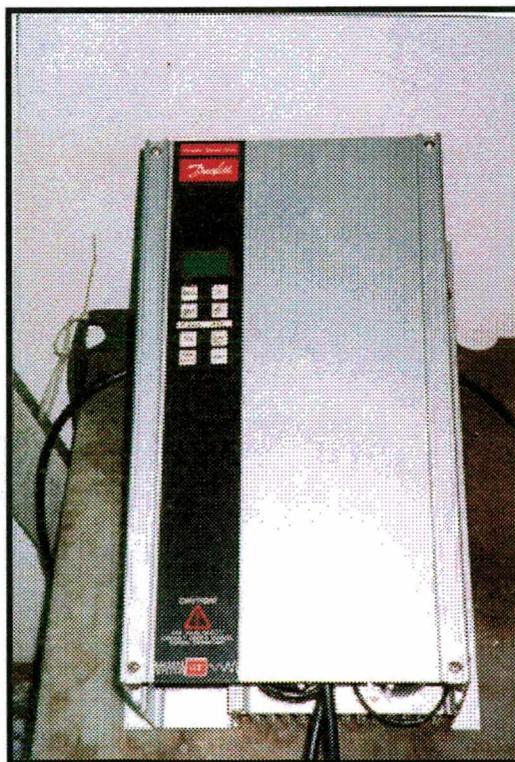


Figura 71 - Variador de frequência.

Além da utilização do variador de frequência, houve a necessidade da escolha de um rebolo adequado ao tipo de retificação a ser executada. Um primeiro rebolo instalado na máquina e destinado a operações de desbaste não forneceu resultados satisfatórios.

O novo rebolo escolhido possui a especificação AA 80 J8 V40W, que significa um rebolo de óxido de alumínio branco, tamanho de grão 80, estrutura fechada e ligante vitrificado [20].

Na avaliação final da usinagem com a mesa de retificação, os ganhos na rugosidade obtidos com a utilização do variador de frequência e a troca de rebolo serão apresentados.

Além destas modificações, foram testados diversos níveis de velocidade de avanço radial, velocidade circunferencial da peça e profundidade de corte visando valores otimizados. O avanço radial foi testado com a mesa de retificação montada diretamente sobre a mesa magnética da máquina. Este avanço é feito manualmente e não possui muita influência no processo. A velocidade circunferencial é regulada “freando” o mancal também manualmente, para que não dispare. Teoricamente, como o arraste do reboło sobre a peça gera este movimento, a peça tende a girar na mesma velocidade tangencial fornecida pelo reboło. Se isso acontecer, não há remoção de material por não haver velocidade de corte no processo. Por fim, a profundidade de corte a ser empregada é de 0,01 mm para cada passe do reboło.

O corpo de prova para todos os ensaios é uma peça circular de aço ABNT 1040, com a forma das sapatas planas utilizadas em mancais. O tipo de aço utilizado é o mesmo empregado pelas empresas especializadas na fabricação de mancais aerostáticos.

7.4.2. ENSAIO COM A RETIFICADORA EM CONDIÇÕES DE RETIFICAÇÃO CONVENCIONAL

A primeira bateria de ensaios foi realizada com o corpo de prova montado diretamente sobre a mesa magnética da retificadora, como mostra a figura 72.

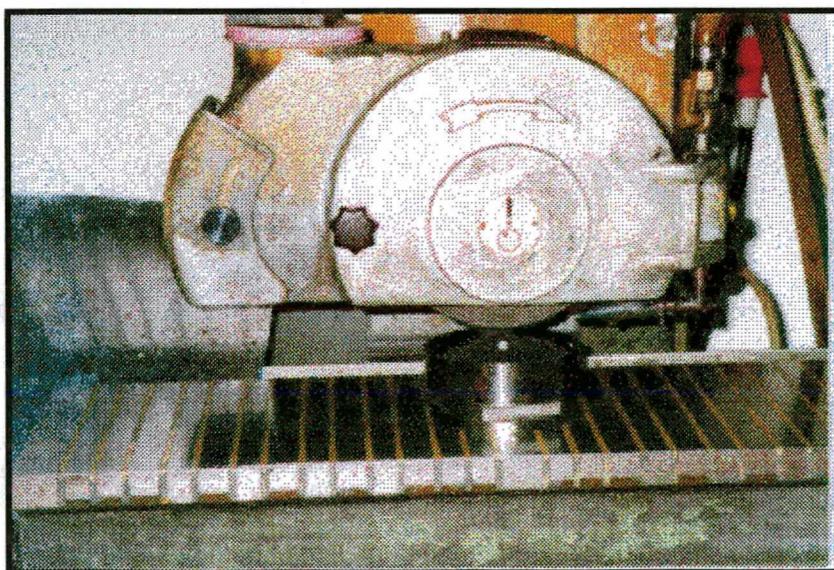


Figura 72 - Retificação do corpo de prova na retificadora convencional.

Foram utilizados os movimentos automáticos longitudinais e transversais próprios da máquina para varrer todo o plano do corpo de prova, conforme operação normal da máquina.

O ensaio foi realizado em três corpos de prova, cujas médias das medições de planicidade e rugosidade são apresentadas no quadro 12.

| Rugosidade | | Planicidade |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| R_a | R_t | $5,2 \pm 1,2 \mu\text{m}$ |
| $0,21 \pm 0,02 \mu\text{m}$ | $2,20 \pm 0,20 \mu\text{m}$ | |

Quadro 12 - Rugosidade e planicidade do corpo de prova retificado sobre a mesa magnética da retificadora.

Estes valores de rugosidade e planicidade servirão de referência para a comparação dos resultados a serem obtidos com a utilização da mesa de retificação. A grande desvantagem desta montagem é a impossibilidade de se obter a conicidade controlada nas sapatas usinadas.

7.4.3. ENSAIO COM A MESA DE RETIFICAÇÃO MONTADA SOBRE A PLACA MAGNÉTICA DA RETIFICADORA

Nesta bateria de ensaios, o movimento de avanço radial foi feito pelo carro transversal da retificadora. Este movimento foi feito com acionamento manual, com velocidade de avanço semelhante à velocidade automática da máquina, empregada na montagem anterior.

Como pode ser observado na figura 73, a velocidade circunferencial da peça também foi controlada manualmente. O arraste do rebolo sobre a peça serviu de acionamento para este movimento circunferencial da mesma, cabendo ao operador “freiar” o mancal até uma faixa de velocidade circunferencial adequada.

Esta faixa de velocidade ótima foi obtida durante os ensaios preliminares e depende da experiência do operador. Para auxiliar no controle desta velocidade, uma marca lateral foi colocada no mancal, aumentando a sensibilidade com relação à mesma.

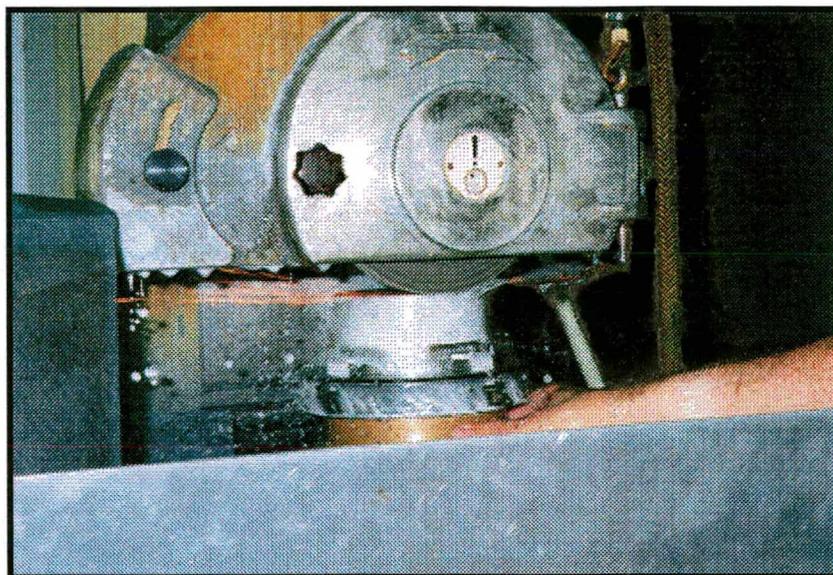


Figura 73 - Ensaio com a mesa de retificação sobre a placa magnética da retificadora.

Da mesma forma empregada na condição anterior, o resultado das médias das três medições de rugosidade e planicidade dos corpos de prova usinados é mostrado no quadro 13. A comparação de todos os resultados será apresentada posteriormente.

| Rugosidade | | Planicidade |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| R_a | R_t | $2,0 \pm 0,4 \mu\text{m}$ |
| $0,14 \pm 0,02 \mu\text{m}$ | $1,50 \pm 0,20 \mu\text{m}$ | |

Quadro 13 - Rugosidade e planicidade do corpo de prova retificado sobre a mesa de retificação montada sobre a mesa magnética da retificadora.

7.4.4. ENSAIO COM A MESA DE RETIFICAÇÃO MONTADA SOBRE AS GUIAS LINEARES AEROSTÁTICAS

A montagem da mesa de retificação e das guias lineares sobre a retificadora foi feita como mostra a figura 74. Todo o conjunto foi montado sobre uma placa de montagem para facilitar sua fixação sobre a retificadora.

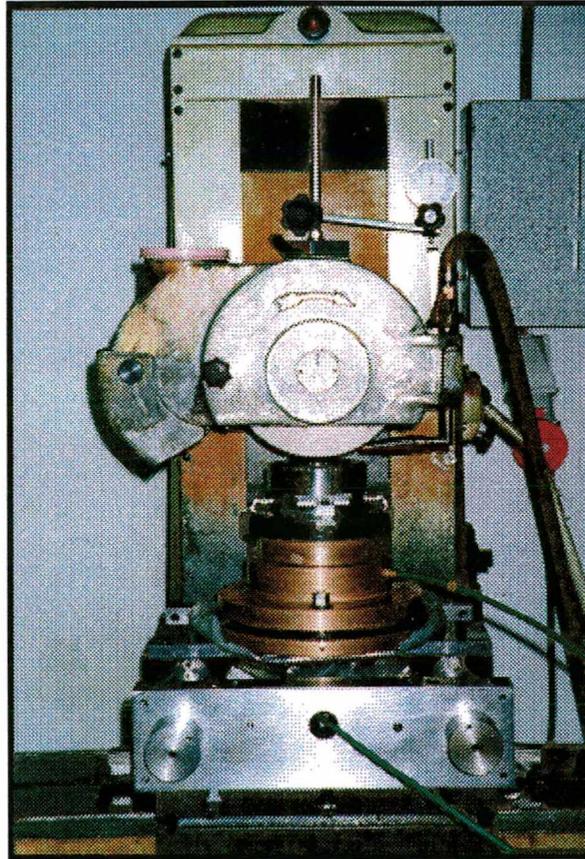


Figura 74 - Montagem da mesa de retificação sobre as guias aerostáticas.

Devido à falta de altura útil da guia vertical da retificadora, a placa magnética da máquina foi desmontada. Desta forma, houve a necessidade de se fazer uma fixação bastante rígida da placa de montagem das guias lineares sobre a mesa principal da retificadora.

Além disso, a disposição dos componentes e a distância do cabeçote com relação à mesa principal da retificadora exigiram a montagem de um sistema de contenção do fluido de corte durante a usinagem. Devido ao movimento circunferencial do mancal da mesa de retificação, o fluido de corte é lançado em todas as direções durante a usinagem, causando perda do fluido e muita sujeira na oficina. O sistema de contenção do fluido de corte pode ser observado na figura 75, que mostra a usinagem de um corpo de prova nesta condição de montagem. Uma outra vantagem do sistema de contenção é a proteção das guias aerostáticas contra o fluido de corte que, por ser a base de água pode causar a indesejável oxidação nas mesmas.

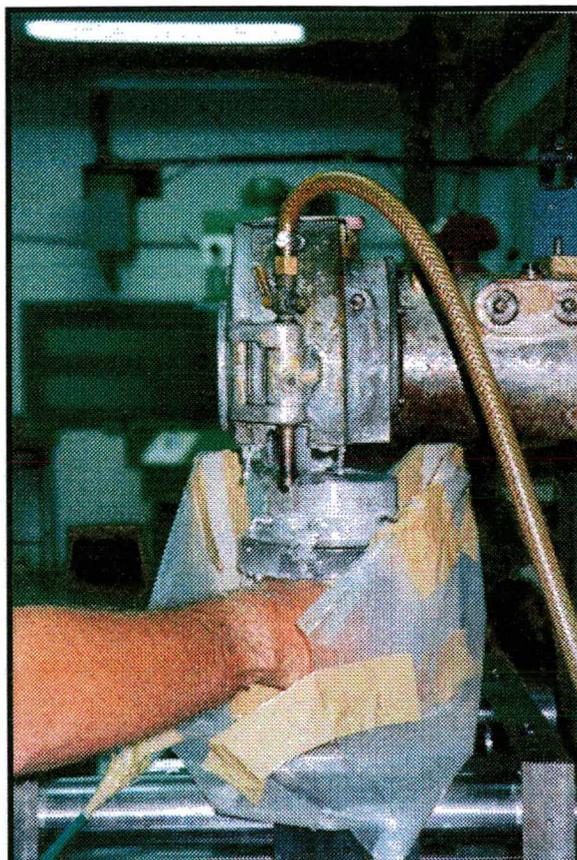


Figura 75 - Ensaio com a mesa de retificação sobre as guias aerostáticas.

Mais uma vez pode-se observar o controle manual da velocidade circular da peça. Além deste, o controle da velocidade de avanço radial também é manual.

Para esta montagem, o resultado das médias das três medições de rugosidade e planicidade dos corpos de prova usinados é mostrado no quadro 14.

| Rugosidade | | Planicidade |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| R_a | R_t | $1,5 \pm 0,3 \mu\text{m}$ |
| $0,18 \pm 0,02 \mu\text{m}$ | $2,00 \pm 0,20 \mu\text{m}$ | |

Quadro 14 - Rugosidade e planicidade do corpo de prova retificado sobre a mesa de retificação montada sobre as guias aerostáticas.

7.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DE USINAGEM

Com relação ao controle de conicidade dos corpos de prova, alguns ensaios com variação nesta conicidade comprovaram a relação calculada no projeto do sistema de inclinação da mesa, capítulo 5. A relação apresentada de $\pm 1 \mu\text{m}/5^\circ$ de deslocamento no parafuso é válida.

No quadro 15 é apresentada a evolução dos resultados obtidos antes e durante os ensaios.

| Condição ensaiada | Rugosidade R_a | Rugosidade R_t | Planicidade |
|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| sem mesa de retificação, 50 Hz e rebolo novo | $0,21 \pm 0,02 \mu\text{m}$ | $2,20 \pm 0,40 \mu\text{m}$ | $5,20 \pm 1,20 \mu\text{m}$ |
| com a mesa de retificação, sem a guia aerostática, 60 Hz e rebolo antigo | $0,85 \pm 0,04 \mu\text{m}$ | $9,50 \pm 1,50 \mu\text{m}$ | não foi medido |
| com a mesa de retificação, sem a guia aerostática, 50 Hz e rebolo antigo | $0,54 \pm 0,03 \mu\text{m}$ | $5,08 \pm 1,20 \mu\text{m}$ | não foi medido |
| com a mesa de retificação, sem a guia aerostática, 50 Hz e rebolo novo | $0,14 \pm 0,02 \mu\text{m}$ | $1,50 \pm 0,40 \mu\text{m}$ | $2,00 \pm 0,40 \mu\text{m}$ |
| com a mesa de retificação, com a guia aerostática, 50 Hz e rebolo novo | $0,18 \pm 0,02 \mu\text{m}$ | $2,00 \pm 0,40 \mu\text{m}$ | $1,50 \pm 0,30 \mu\text{m}$ |

Quadro 15 - Comparação total dos resultados de usinagem.

Uma primeira análise do quadro 15 mostra a evolução da qualidade superficial dos corpos de prova após tomadas as medidas de redução da frequência de alimentação da rede e troca do rebolo. Esta melhora foi muito significativa e fundamental para o processo.

Analisando as três condições propostas de ensaios, com seus valores otimizados, percebe-se uma sensível redução dos valores de rugosidade R_a e R_t com a utilização da mesa de retificação. Da mesma forma, também há uma sensível redução dos valores de planicidade com a utilização da mesa de retificação.

Com relação à comparação entre a usinagem com e sem as guias lineares aerostáticas, na rugosidade esperava-se encontrar valores bastante aproximados tanto em R_a quanto em R_t para ambos os casos, já que em termos de processo, as duas condições são muito semelhantes.

O acréscimo na rugosidade das peças usinadas com guia aerostática pode ser explicado na maior instabilidade desta montagem com relação à montagem sem as guias. A figura 74 mostra a montagem com as guias aerostáticas, onde pode-se notar uma quantidade muito grande de componentes montados em série, o que diminui de forma muito significativa a rigidez de todo o sistema. Uma fixação mais rígida deste sistema pode reduzir ou até anular esta diferença na rugosidade.

Na medição de planicidade, os valores obtidos com a guia aerostática são mais baixos do que na condição sem as guias. Isto é totalmente previsível visto que as guias aerostáticas apresentam uma qualidade muito maior nos seus movimentos.

Em termos absolutos, os resultados obtidos não são ótimos. Há a necessidade de otimização dos parâmetros do processo de retificação para se alcançar valores de rugosidade e planicidade melhores.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Um realista é uma pessoa que mantém a distância correta de seus ideais.

Truman Capote (1924-1984).

O desenvolvimento de componentes ou sistemas de alta precisão, como é o caso de mancais aerostáticos, foi, é e sempre será um desafio aos pesquisadores.

A estrutura necessária para a fabricação destes sistemas deve ser muito especializada e acompanhada de mão-de-obra altamente qualificada.

Atingir um nível aceitável de qualidade em um mancal aerostático utilizando poucos recursos tanto financeiros quanto materiais pode ser considerado um grande desafio vencido.

A grande escola no desenvolvimento de trabalhos deste tipo é saber que nunca se tem o controle total da situação, que cada passo cuidadosamente dado pode colocar o trabalho de muito tempo a perder. Além disso, cada um desses passos deve ser meticulosamente avaliado, exigindo muito mais raciocínio do que ação.

Uma característica deste tipo de trabalho é a necessária multidisciplinariedade exigida, que amplia muito os campos de conhecimento.

De acordo com os objetivos especificados no capítulo 1, pode-se concluir que:

1. A procura por uma concepção ideal para a mesa de retificação resultou na configuração apresentada na figura 46, no final do capítulo 4. Nela são apresentados os princípios de funcionamento mais adequados para cada uma das funções exigidas da mesa de retificação;
 2. O projeto detalhado dos componentes da mesa é apresentado como forma de anexo do trabalho, fornecendo todas as especificações de tolerâncias dimensionais para o correto funcionamento da mesa;
 3. A partir do projeto, procedeu-se a fabricação e montagem dos componentes da mesa. Nesta etapa encontraram-se as maiores dificuldades do trabalho, na procura pela garantia de
-

fabricação e correta montagem dos componentes da mesa. Não basta “mandar fazer” os componentes, principalmente do mancal aerostático, é necessário um trabalho intenso de ajustagem de precisão para poder colocá-lo em funcionamento. Esta ajustagem só é possível após uma grande experiência de trabalho com sistemas deste tipo;

4. A comprovação dos valores calculados de capacidade de carga e rigidez para o mancal foi feita através do ensaio estático. Os valores práticos superaram a expectativa teórica devido ao grande esforço no ajuste final do mancal; e
5. Os ensaios de usinagem comprovaram a eficiência da mesa de retificação na melhoria da qualidade dos corpos de prova usinados, mas devem ainda ser otimizados para se atingir resultados ainda mais expressivos;

Fazendo-se uma análise global do trabalho, podem ser identificados diversos pontos positivos e negativos deste desenvolvimento.

Os pontos positivos que mais chamaram a atenção foram:

- A proposta de fabricação de mancais moldados com restritores inseridos após a moldagem abre uma nova técnica a ser estudada para a fabricação de mancais de baixo custo. Estes restritores apresentaram ótimos resultados e possuem uma característica de alta similaridade;
- A proposta de utilização de molas prato na interface dos dois mancais básicos (plano e esférico) que formam a configuração adotada, se mostrou bastante eficiente na resolução de um antigo problema encontrado na montagem de mancais aerostáticos, que é a dificuldade de obtenção de uma folga nominal controlada e uniforme. Com as molas prato, este ajuste de folga ficou simples e eficiente;
- A utilização do parafuso diferencial para gerar a conicidade na sapata plana circular possibilitou a obtenção de ótimos resultados, permitindo um controle bastante fino desta grandeza; e
- A melhora superficial dos corpos de prova com a utilização da mesa de retificação, apesar de ainda não estar otimizada, provou um sucesso inicial do projeto, validando o trabalho executado.

Os pontos negativos observados foram:

- A necessidade de “abrir” o mancal diversas vezes para ajustes ou para manutenção devido à entrada de água na linha de ar comprimido em algumas ocasiões prejudicou um pouco o desempenho dos restritores, pela necessidade de constantes limpezas das superfícies com clorofórmio, que é altamente agressivo à resina utilizada na sua fabricação;
- A falta de um equipamento mais completo para a medição de rugosidade dos corpos de prova limitou as conclusões sobre o processo;
- A necessidade de alterar a característica de alimentação da máquina-ferramenta, de 60 para 50 Hz, descaracterizou um pouco a condição inicial do trabalho de utilizar uma máquina convencional da forma como ela é, sem modificações tão expressivas; e
- A falta de tempo impossibilitou a realização de mais ensaios para a otimização do processo de retificação sobre a mesa, que é diferente do processo convencional.

Alguns trabalhos poderão dar continuidade a esta linha de pesquisa, como:

1. Otimização do processo de retificação sobre a mesa de retificação, para melhorar os resultados de usinagem sobre a mesa;
 2. Aplicação das técnicas de fabricação de restritores e de ajuste de folga em outras configurações de mancais aerostáticos de difícil fabricação;
 3. Utilização de acionamento no controle da velocidade circunferencial da peça durante a retificação para uniformizar o movimento;
 4. Aplicação da mesa de retificação em outros tipos de retificadoras;
 5. Estudo do mecanismo de remoção de cavacos na retificação com a mesa aerostática; e
 6. Modelamento do processo de retificação com mesa aerostática.
-

CAPÍTULO 9

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] - WEINGAERTNER, W. L. **Desenvolvimentos na usinagem de ultra-precisão.** Florianópolis, 1992. Monografia - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [02] - STOETERAU, R. L. **Comportamento estático e dinâmico de luvas aerostáticas para guias lineares.** Florianópolis, 1992. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [03] - ROCHA, A. S. **Contribuições para a fabricação de mancais aerostáticos.** Florianópolis, 1993. Tese (Doutorado em Eng. Mecânica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [04] - OLIVEIRA, P. R. M. **Projeto, fabricação e qualificação de um mancal aerostático duplo-esférico.** Florianópolis, 1994. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [05] - MÜLLER, L. A. **Desenvolvimento de um cabeçote de precisão.** Florianópolis, 1994. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [06] - BACK, N., **Metodologia de projeto de produtos industriais,** Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1983.
- [07] - PRATA, A. T. **Teoria da Lubrificação.** 1994. (anotações de sala de aula).
- [08] - BOFFEY, D. A.; DUNCAN, A. E.; DEARDENT, J. K. An experimental investigation of the effect of orifice restrictor size on the stiffness of an industrial air lubricated thrust bearing. **Tribology International**, october 1981.
- [09] - MENDONÇA, K.; PRATA, A. T.; **Influência dos erros de cilindridade e circularidade no desempenho de mancais radiais finitos operando em carregamento estático.** Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade
-

- Federal de Santa Catarina, [1994].
- [10] - VICTOR, H. R.; SCHMIDT, J. **Entwicklung aerostatischer Lager nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten**. - Annals of CIRP, Vol. 24/1/1975
- [11] - REHSTEINER, F. H.; CANNON JR., R. H. Static properties of hydrostatic thrust gas bearings with curved surfaces. **Journal of Lubrication Technology**, january, 1972.
- [12] - SLOCUM, A. H. **Precision Machine Design**. Prentice Hall: Cambridge 1991
- [13] - WHITE, J. W. Surface roughness effects on the load carrying capacity of very thin compressible lubricating films. **Journal of Lubrication Technology**, Vol. 102 october, 1980.
- [14] - WHITEHOUSE, D. J. **Handbook of Surface Metrology**, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1994
- [15] - TÖNSHOFF, H. K.; WULFBERG, J. P.; KALS, H. J. J.; KÖNIG, W.; VAN LUTTERVELT, C. A. **Developments and trends in monitoring and control of machining processes**. Annals of the CIRP Vol. 37/2/1988.
- [16] - PURQUÉRIO, B. M.; BALESTERO, L. A. Mancais fluídicos aerostáticos com ranhuras de alimentação. **Máquinas e Metais**. 48-58. abril, 1991.
- [17] - BYRNE, G.; DORNFELD, D.; INASAKI, I.; KÖNIG, W.; TETI, R. **Tool condition monitoring (TCM) - the status of research and industrial application**. Annals of the CIRP Vol. 44/2/1995.
- [18] - WU, S. M.; NI, J. **Precision machining without precise machinery**. Annals of the CIRP Vol. 38/1/1989
- [19] - ROMICRON/ROMI. **Sistema de alta precisão para usinagem de furos**. Santa Bárbara do Oeste, 1987. Catálogo de exposição.
- [20] - DE BARBA JUNIOR, D. J. **Desenvolvimento de tecnologia de fabricação de limas Hedström**. Florianópolis, 1997. (Mestrado em Eng. Mecânica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [21] - HURTH INFER INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E FERRAMENTAS. **Divisor Horizontal**. Sorocaba. Catálogo de exposição, [199-].
-

-
- [22] - IBAG Zürich AG. **Koyo-ibag schnellauf-spindelkopf**, Zürich, Catálogo de exposição, [199-].
- [23] - FAÉ MATRIZES E DISPOSITIVOS LTDA. **Cabeçotes fresadores e retificadores planetários**. Caxias do Sul. Catálogo de exposição, [199-].
- [24] - SU-MATIC. **Merhspindeltechnik** (cabeçote multifuso). Brugg, Suíça, 1995. Catálogo de exposição.
- [25] - VERTEX PRECISION MACHINE TOOLS. **Precision milling machine accessories**. Taiwan. Catálogo de exposição, [199-].
- [26] - KONIG, W. **Retificação, brunimento e lapidação**. Aachen, fevereiro, 1980.
- [27] - DEUTSCHE INDUSTRIE NORMEN. **Fertigungsverfahren-Spanen**. 8589. Deutschland, [19 - -].
- [28] - MOTION & CONTROL NSK. **NSK Rolamentos**. São Paulo, 1996.
- [29] - WECK, M. et al. **High precision spindle technology**. Tutorial 6th IPES/UME 2, IPT - Aachen, May 1991.
- [30] - STOETERAU, R. L. **Desenvolvimento de máquinas-ferramentas para usinagem de ultraprecisão (com ferramentas de geometria definida)**. Florianópolis, 1996.
- [31] - NSK, MOTION & CONTROL. **NSK Linear Guide**. Japan, 1996. Catálogo de exposição.
- [32] - NSK. **Produtos de precisão**, São Paulo, 1997. Catálogo de exposição.
- [33] - MULLER, L. A. **Projeto RT 400**. (publicação interna) maio 1994. Laboratório de Mecânica de Precisão, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [34] - VALLEJOS, R. V. **Processos e modos de fabricação de superfícies esféricas de precisão**. Florianópolis, 1992. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina
- [35] - CRICHIGNO FILHO, J. M. **Simulação numérica do processo de lapidação plana como ferramenta para otimização do processo**. Florianópolis, 1994. Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa
-

Catarina.

- [36] - PEREIRA, M.; PRATA, A. T. **Análise comparativa entre simulação numérica e dados experimentais da capacidade de carga de um mancal aerostático semi-esférico variando o número de restritores de alimentação**. Publicação Interna - Laboratório de Mecânica de Precisão, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.
- [37] - CONGRESSO IBERO LATINO AMERICANO SOBRE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA (15 : 1994 : Belo Horizonte). **Anais**. Belo Horizonte, 1994.
- [38] - DEUTSCHE INDUSTRIE NORMEN. **Mueles de platillo -Medidas y propiedades de calidad**. 2092. Deutschland, [19 - -].
- [39] - DEUTSCHE INDUSTRIE NORMEN. **Mueles de platillo - Cálculo**. 2092. Deutschland, [19 - -].
- [40] - ARALDITE. **Resinas epóxi para ferramentaria**. São Paulo. Catálogo de exposição, [199-].
- [41] - PROFESSIONAL INSTRUMENTS COMPANY. **Block-head operator's manual**. Minneapolis, Minnesota, USA, [199-].
- [42] - BROWN AND SHARP. **Vertical CMMs**. France. Catálogo (INTERNET: <http://www.bwnshp.com/ms/mshard.htm>
- [43] - PROFESSIONAL INSTRUMENTS COMPANY. **Block-head air bearing spindle**. Minneapolis, Minnesota, USA. Catálogo de exposição, [199-].

OUTRAS OBRAS CONSULTADAS

- [44] - MULLER, L. A. **Usinagem de ultraprecisão**. Laboratório de Mecânica de Precisão, Universidade Federal de Santa Catarina. outubro, 1993.
-

-
- [45] - MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 2nd Edition. John Wiley & Sons. New York 1983.
- [46] - OHMORI, H; TAKAHASHI, I; NAKAGAWA, T. **Mirror surface grinding by metal bonded super-abrasive wheel with electrolytic in process dressing**. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, [199-].
- [47] - OHMORI, H; NAKAGAWA, T. **Analysis of mirror surface generation of hard and brittle materials by ELID (Electronic In-Process Dressing) grinding with superfine grain metallic bond wheel**. Annals of the CIRP Vol. 44/1/1995.
- [48] - KÖNIG, W; WECK, M; SPENRATH, N; LUDERICH, J. **Diamond machining technology**. Tutorial 6 th IPES/UME 2, IPT, May 1991.
- [49] - MOORE, W. R. **Foundations of mechanical accuracy**. The Moore Special Tool Company. Bridgeport, Connecticut. USA, 1970.
- [50] - RISSE, S; GUYENOT, V; GEBHARDT, A; MARSCHNER, F. **Aerostatisches glaslager**. F & M 104 , 1996.
- [51] - FAWCETT, S.C; DOW, T.A. **Influence of wheel speed on surface finish and chip geometry in precision contour grinding**. Precision Engineering, Vol 14 July 1992.
- [52] - ENOMOTO, T; SHIMAZAKI, Y; TANI, Y;SATA, T. **Improvement of form accuracy in axisymmetrical grinding by considering the form generation mechanism**. Annals of the CIRP Vol. 45/1/1996.
- [53] - HOLSTER, P. L.; JACOBS, J. A. H. **Theoretical analysis and experimental verification on the static properties of externally pressurized air-bearing pads with load compensation**. TRIBOLOGY International. Vol 20 October 1987.
- [54] - RASNICK, W. H.; AREHART, T. A.; LITTLETON, D. E.; STEGER, P. J. **Porous graphite air-bearing components as applied to machine tools**. SME 1974.
- [55] - LICHT, L.; KAUL, R. K. . Effect of misalignment on a circular, externally pressurized, gas-lubricated bearing. **Journal of Applied Mechanics**. March, 1964.
- [56] - AEROSTA.EXE. 1.0. Planejamento de guias lineares, mesas circulares e eixos mancalizados aerostaticamente. Torsten Bispink Etal. Torsten Bispink Etal.
-

Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie. Aachen, Deutschland. [198-]. 1 disquete de 5 ¼ pol. BASIC.

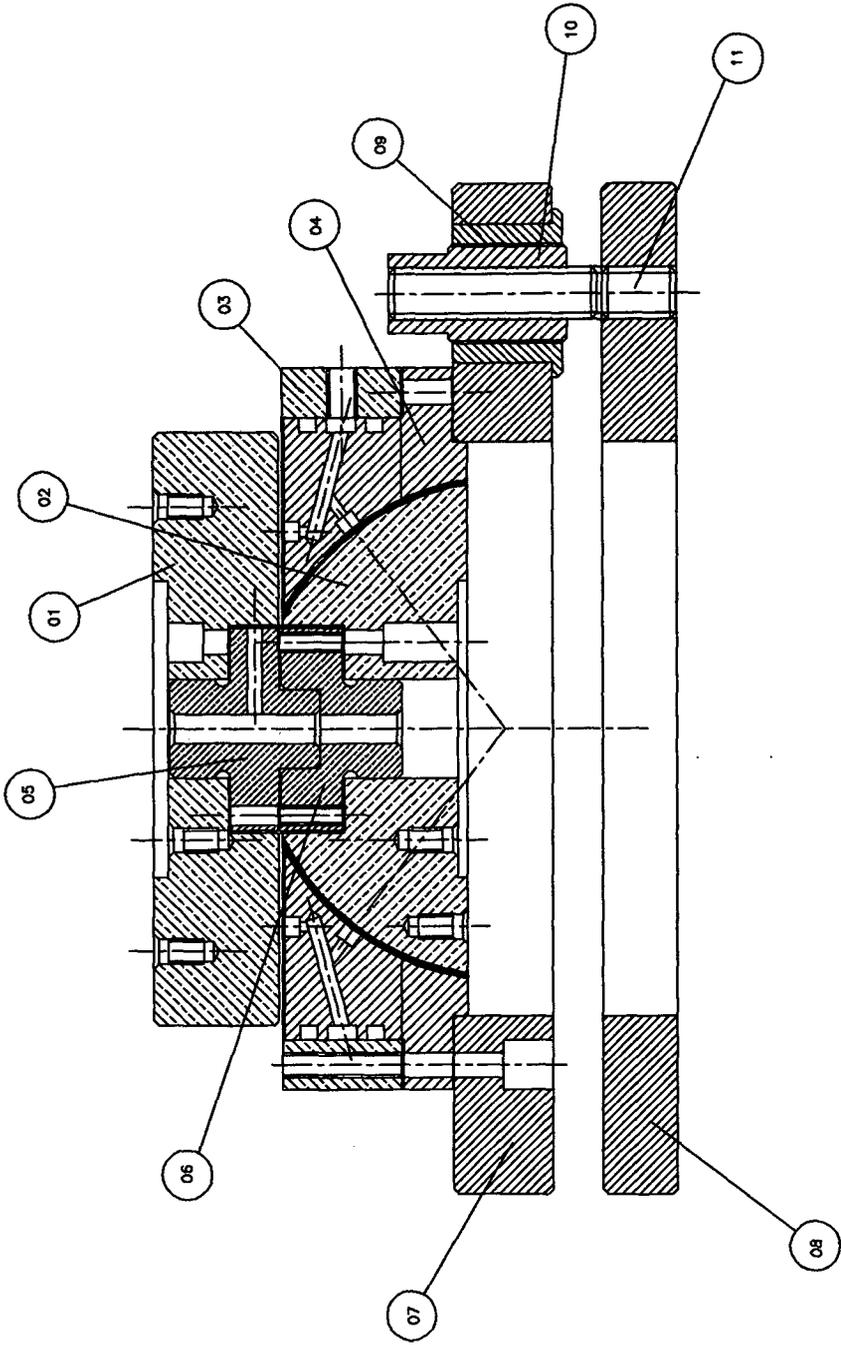
- [57] - ESHGHY, S.. Optimum design of multiple-hole inherently compensated air bearings. **Journal of Lubrication Technology**. April, 1975.
- [58] - PANDE, S. S. **Analysis of tapered land aerostatic bearings for combined radial and thrust loads (Yate's configuration)**. Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology. Março, 1985.
- [59] - SCHNEIDER, C. A. **Ensaio geométricos de máquinas-ferramentas**. Laboratório de Metrologia, Universidade Federal de Santa Catarina, junho, 1987.
- [60] - INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. **Acceptance Code for Machine Tools - Part 1: Geometric Accuracy of Machines Operating Under No-load or Finishing Conditions**. 230/1-1986. United States of America.
- [61] - KOBAYASHI, A.; HOSHINA, N.; TSUKADA, T.; UEDA, K. **High precision cutting with a new ultra precision spindle**. Annals of the CIRP Vol. 27/1/1978.
-

CAPÍTULO 10

ANEXO I

A seguir são apresentados os desenhos dos componentes da mesa de retificação. Pela ordem, serão mostrados:

- Desenho de conjunto da mesa;
 - Sapata plana circular do mancal aerostático;
 - Semi-esfera do mancal aerostático;
 - Carcaça externa do mancal;
 - Estator do mancal aerostático;
 - Eixos intermediários do mancal aerostático;
 - Suporte do mancal aerostático;
 - Base da mesa de retificação;
 - Bucha com rosca diferencial interna;
 - Parafuso diferencial com roscas interna e externa;
 - Parafuso com rosca diferencial externa; e
 - Placa de fixação dos corpos de prova.
-



| QUANT. | DENOMINAÇÃO | PEÇA | ESPECIFICAÇÃO |
|--------|---------------|------|---------------|
| 01 | Eixo 02 | 06 | Aço INOX |
| 01 | Eixo 01 | 05 | Aço INOX |
| 01 | Estator | 04 | Brnze |
| 01 | Carcaca | 03 | Brnze |
| 01 | Esfera | 02 | Brnze |
| 01 | Mancael Plano | 01 | Brnze |

| DESVIOS MEDIOS ADMISSIVEIS PARA MEDIDAS SEM TOLERANCIAS INDICADAS - (DIN 7185) | | | |
|--|------|------|------|
| 1 | A | 6 | 30 |
| A | 30 | A | 120 |
| ±0.1 | ±0.2 | ±0.3 | ±0.5 |
| 1000 | 315 | 1000 | 2000 |
| ±0.8 | ±1.2 | | |

| ESCALA | GRUPO |
|--------|--------|
| 1:1 | MAQFER |

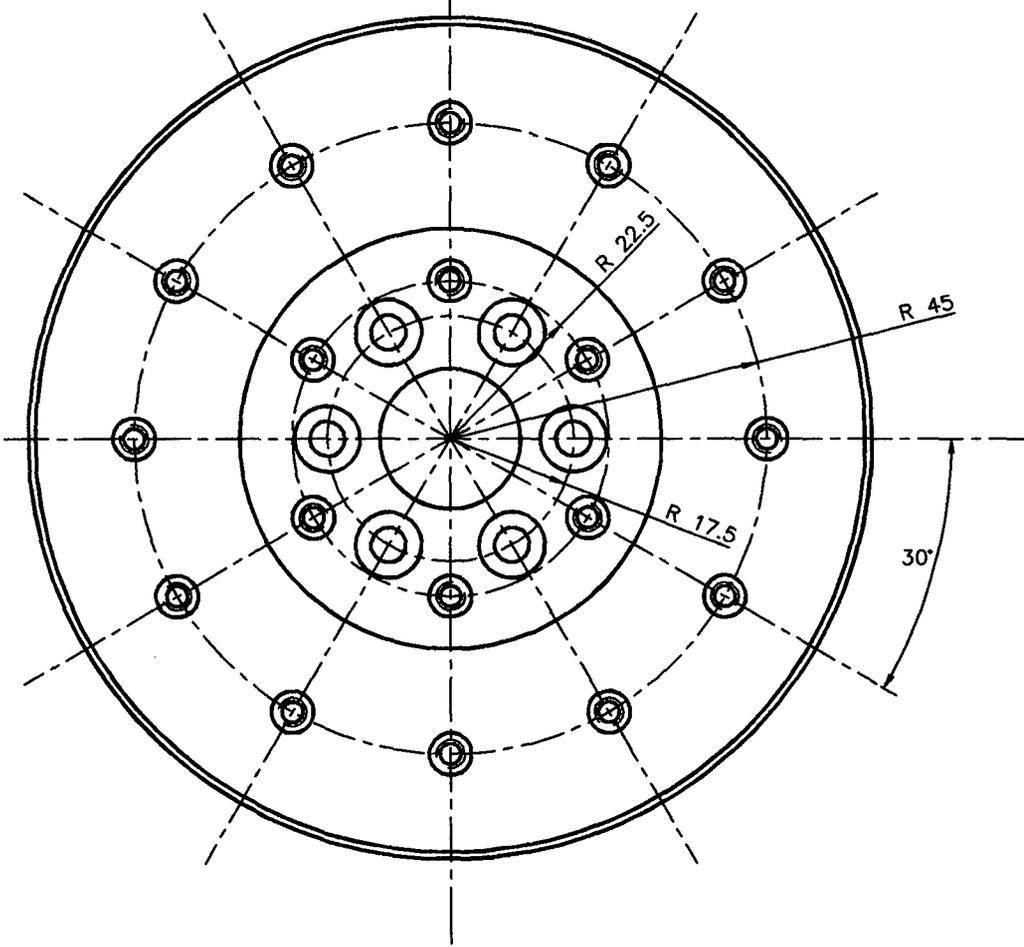
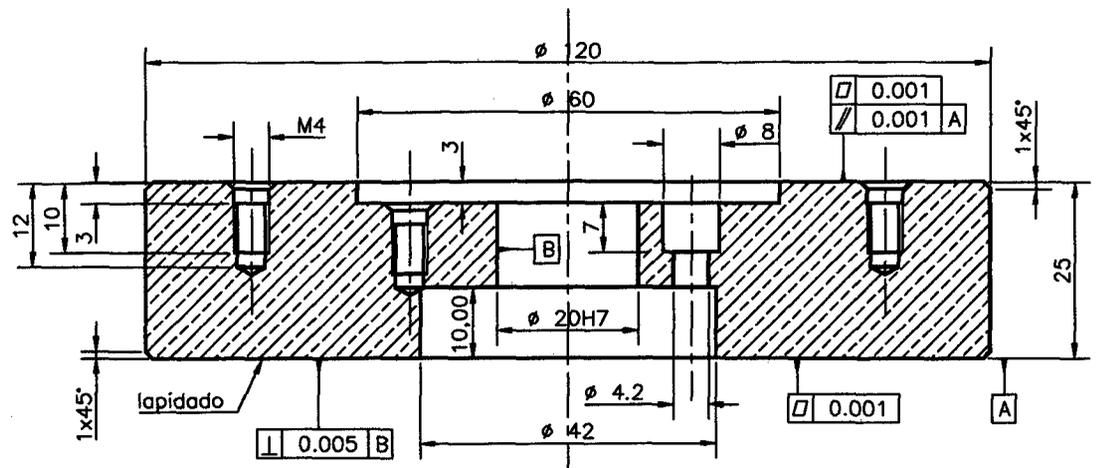
| SERVICO/PROJETO | Data: 08/04/97 | Data: 08/04/97 |
|----------------------------|----------------|----------------|
| Resposavei: Milton Pereira | | |

| LABORATORIO DE MECANICA DE PRECISAO | |
|-------------------------------------|--|
| MESA DE RETIFICACAO | |

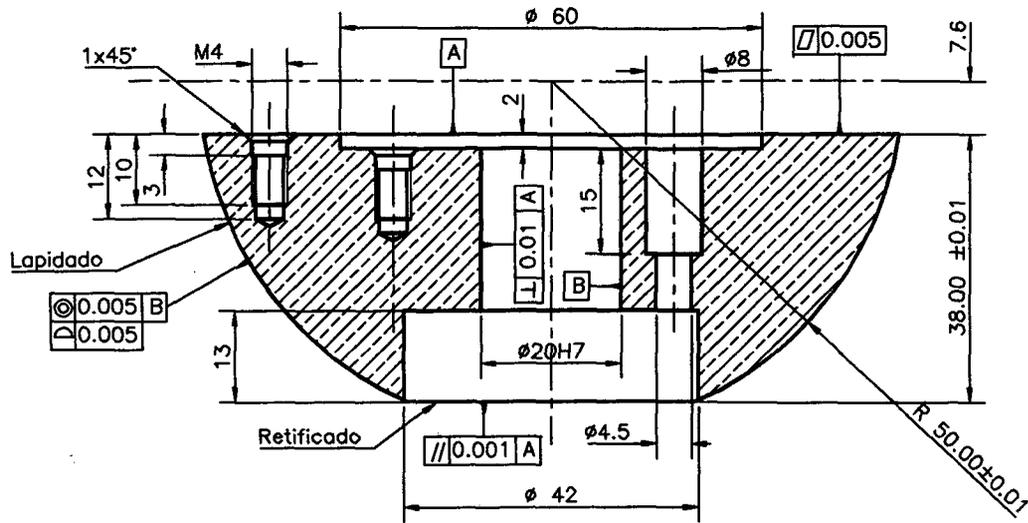
| SERVICO/PROJETO | |
|---------------------|--|
| MESA DE RETIFICACAO | |

| DESENHO | 100-0964 |
|---------|----------|
| | |

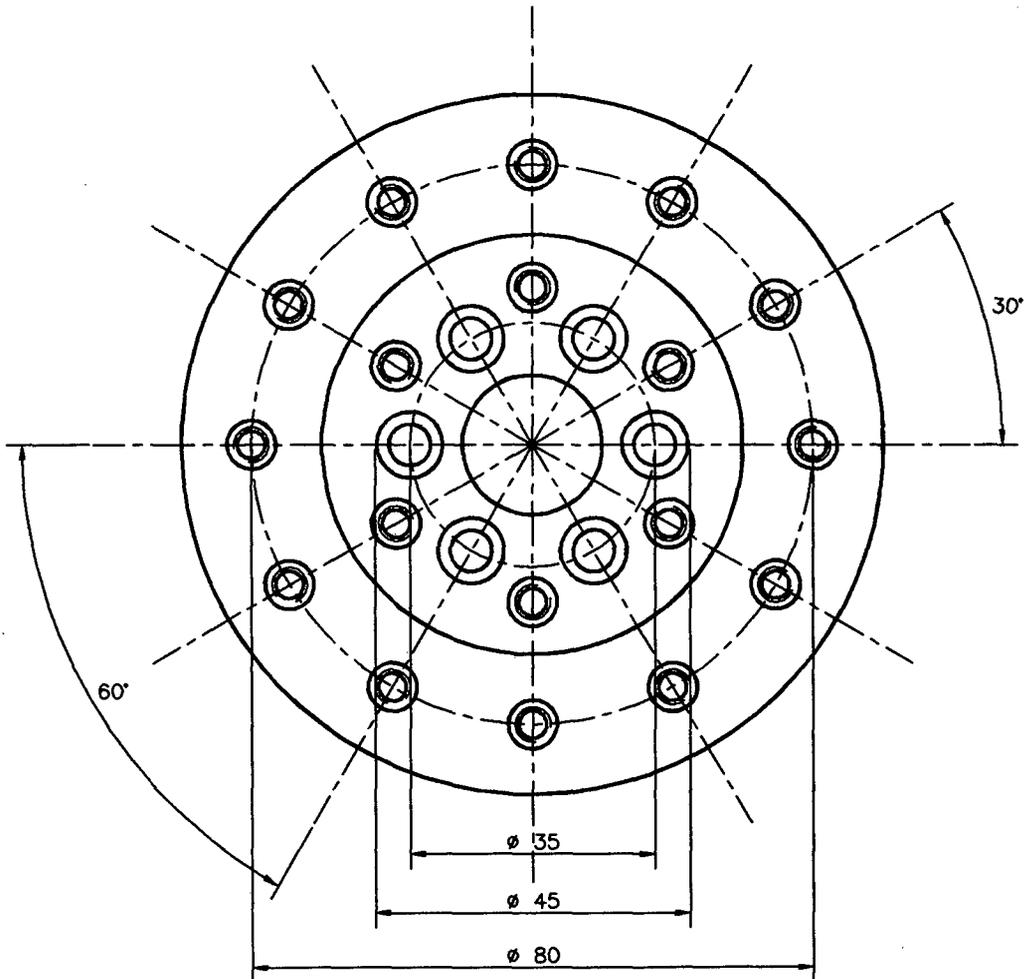
| QUANT. | DENOMINAÇÃO | PEÇA | ESPECIFICAÇÃO |
|--------|-------------------------------------|------|---------------|
| 04 | Parafuso diferencial interno | 11 | Aço INOX |
| 04 | Parafuso diferencial externo | 10 | Aço INOX |
| 04 | Bucha com rosca diferencial externa | 09 | Aço INOX |
| 01 | Base | 08 | Brnze |
| 01 | Suporte do Mancael | 07 | Brnze |



| | | | | |
|---|--|--------------------------|---|---|
| 01 | Mancal Plano | 01 | Bronze | |
| QUANT. | DENOMINAÇÃO | PEÇA | ESPECIFICAÇÃO | |
|  <p>LMP LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PRECISÃO</p> | DESVIOS MEDIOS ADMISSÍVEIS PARA MEDIDAS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS - (DIN 7165) | | ESCALA 1:1 | |
| | 1 A 6 ±0,1 | 6 A 30 ±0,2 | 30 A 120 ±0,3 | GRUPO MAQFER |
| | 120 A 315 ±0,5 | 315 A 1000 ±0,8 | 1000 A 2000 ±1,2 | DESenho: Milton Pereira Data: 25/02/97 |
| | Responsável: Milton Pereira Data: 25/02/97 | | SERVIÇO/PROJETO MESA DE RETIFICACAO DESENHO 100-0965 | |

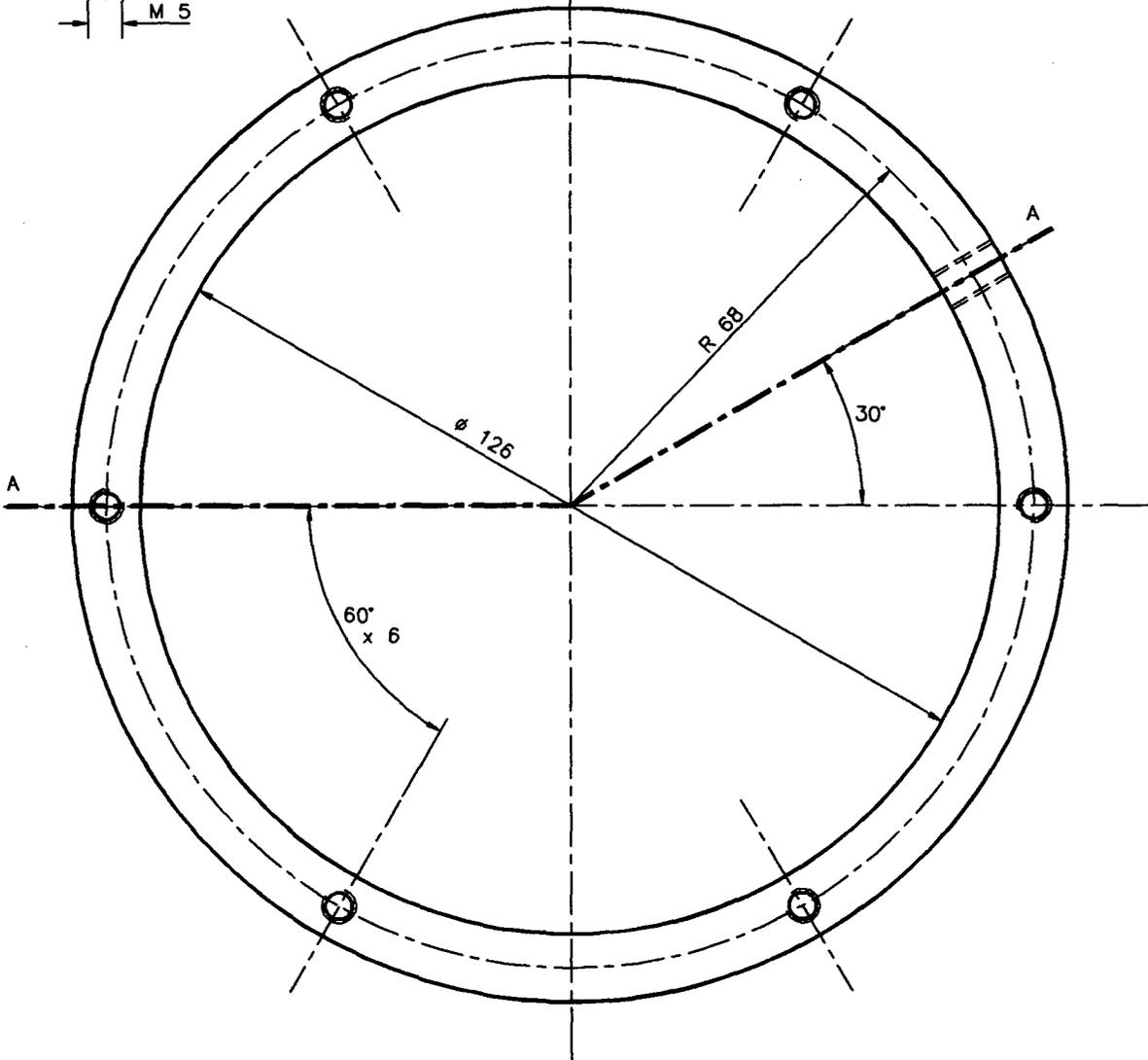
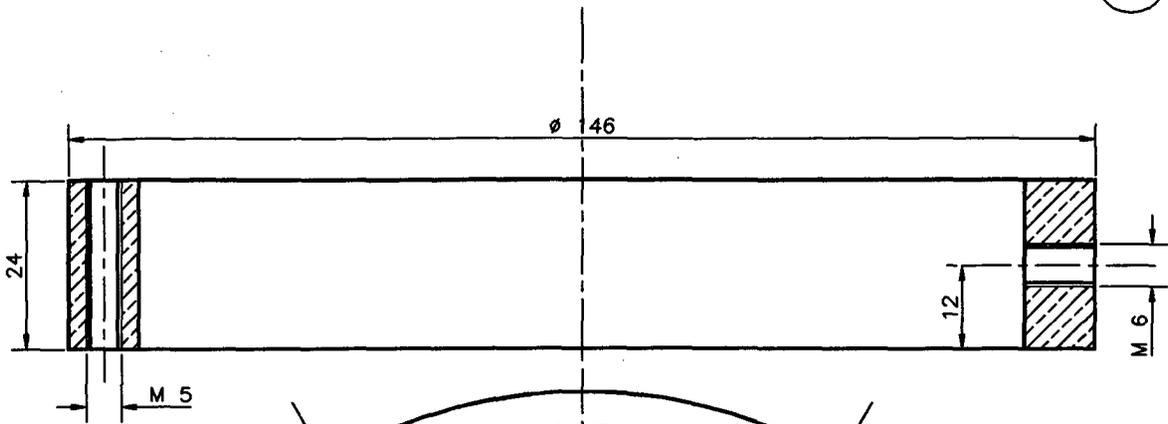


02

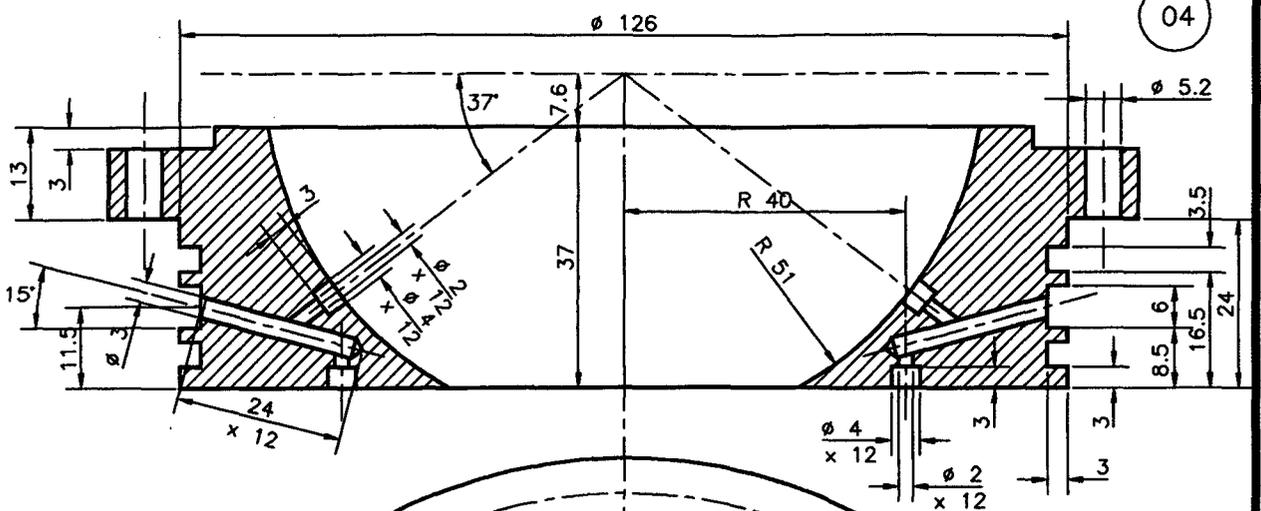


| | | | |
|--------|-------------|------|---------------|
| 01 | Esfera | 02 | Bronze |
| QUANT. | DENOMINAÇÃO | PEÇA | ESPECIFICAÇÃO |

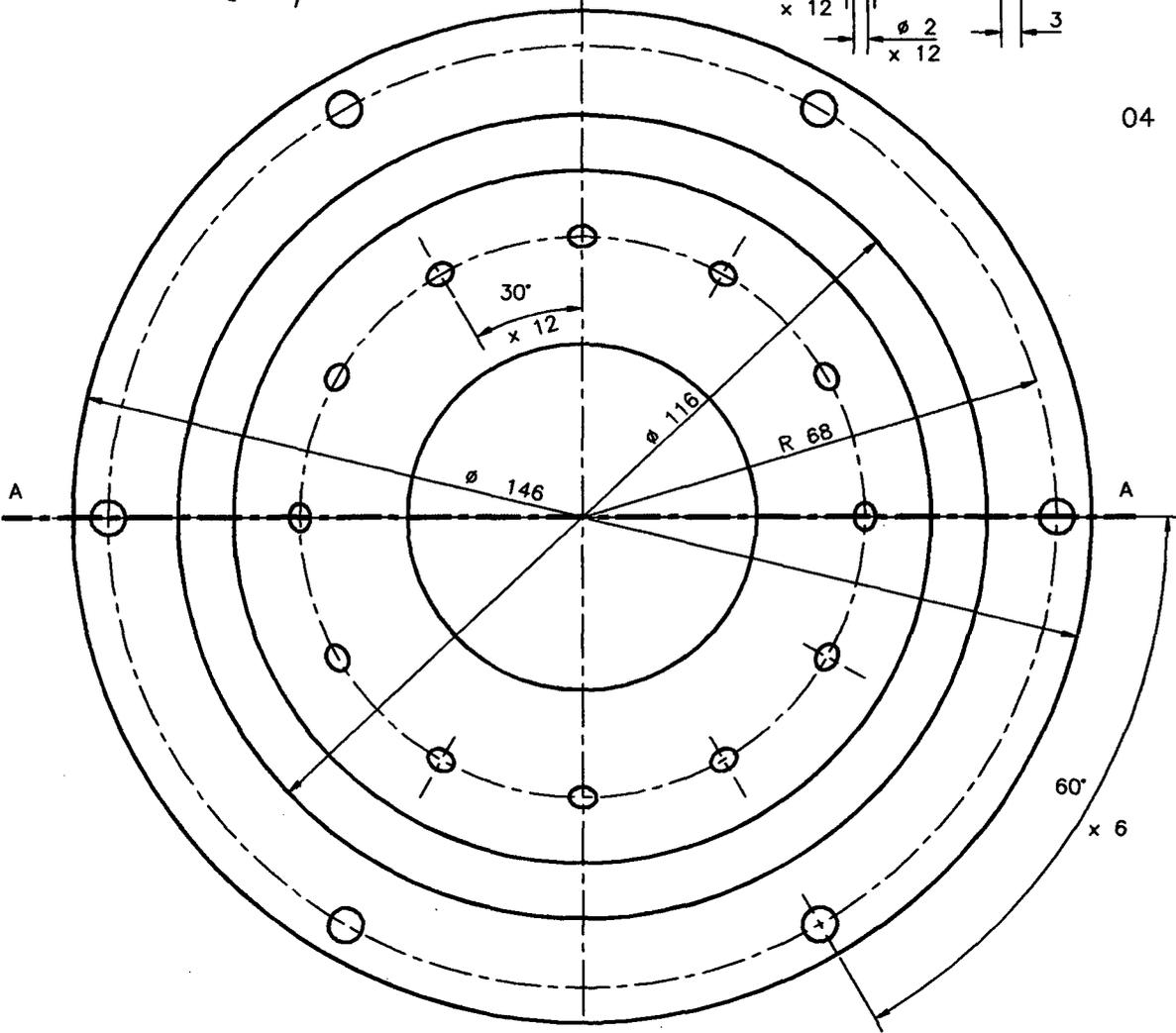
| | | | | | | | |
|---|--|------|------|------|------|----------------------------|--|
|  <p>LMP LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PRECISÃO</p> | DESVIOS MEDIOS ADMISSÍVEIS PARA MEDIDAS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS - (DIN 7165) | | | | | | ESCALA <p>1:1</p> |
| | 1 | 6 | 30 | 120 | 315 | 1000 | GRUPO <p>MAQFER</p> |
| | A | A | A | A | A | A | |
| | ±0,1 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 | ±0,8 | ±1,2 | Desenho: Milton Pereira Data: 18/02/97 Responsavel: Milton Pereira Data: 18/02/97 |
| SERVIÇO/PROJETO <p>MESA DE RETIFICACAO</p> | | | | | | DESENHO <p>100-0966</p> | |



| | | | | | | | |
|---|--|----------------|---------------------|---------------------|------|------|-----------------|
| 01 | Carcaca | 03 | Bronze | | | | |
| QUANT. | DENOMINAÇÃO | PEÇA | ESPECIFICAÇÃO | | | | |
|  <p>LMP LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PRECISÃO</p> | DESVIOS MÉDIOS ADMISSÍVEIS PARA MEDIDAS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS - (DIN 7165) | | | ESCALA 1:1 | | | |
| | 1 | 6 | 30 | 120 | 315 | 1000 | GRUPO MAQFER |
| | A | A | A | A | A | A | |
| | 6 | 30 | 120 | 315 | 1000 | 2000 | |
| | ±0,1 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 | ±0,8 | ±1,2 | |
| Desenho: Milton Pereira | | Data: 24/02/97 | | DESENHO 100-0967 | | | |
| Responsavel: Milton Pereira | | Data: 24/02/97 | | | | | |
| SERVIÇO/PROJETO MESA DE RETIFICACAO | | | DESENHO 100-0967 | | | | |



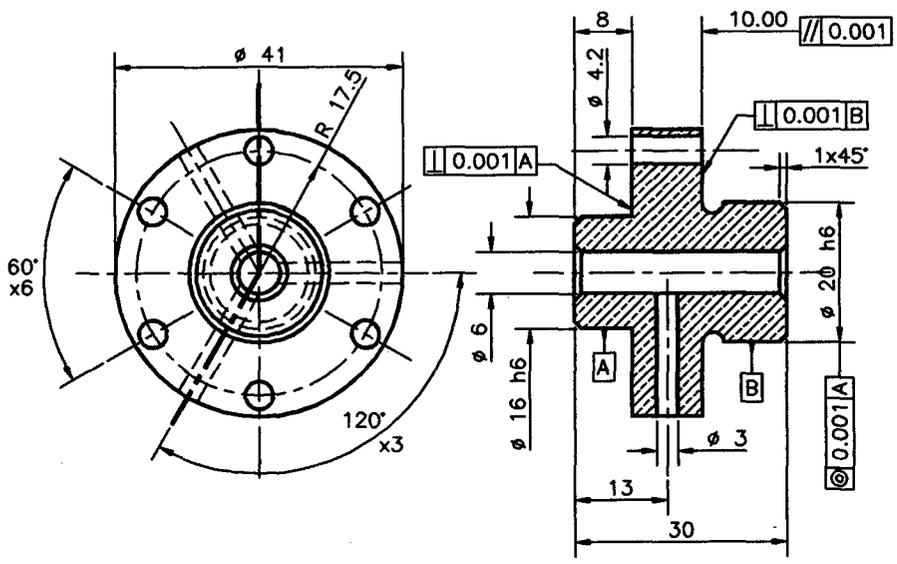
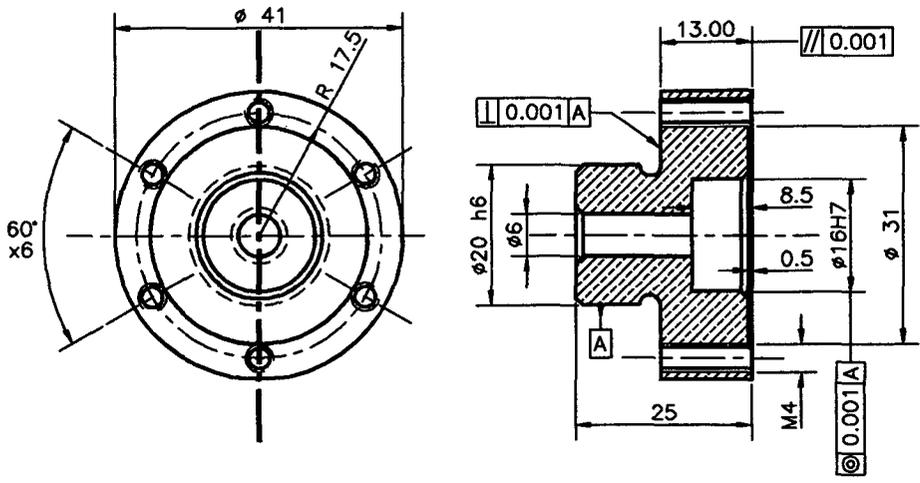
04



04

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------|------|--------------------------------|------|------|-----|-----|------|---|---|---|---|---|---|------|------|------|------|------|------|--------------------------|
| 01 | Estator | 04 | Bronze | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| QUANT. | DENOMINAÇÃO | PEÇA | ESPECIFICAÇÃO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>DESVIOS MEDIOS ADMISSÍVEIS PARA MEDIDAS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS - (DIN 7165)</p> <table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>6</td> <td>30</td> <td>120</td> <td>315</td> <td>1000</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>A</td> </tr> <tr> <td>±0,1</td> <td>±0,2</td> <td>±0,3</td> <td>±0,5</td> <td>±0,8</td> <td>±1,2</td> </tr> </table> | | | 1 | 6 | 30 | 120 | 315 | 1000 | A | A | A | A | A | A | ±0,1 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 | ±0,8 | ±1,2 | <p>ESCALA</p> <p>1:1</p> |
| 1 | 6 | 30 | 120 | 315 | 1000 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A | A | A | A | A | A | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ±0,1 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 | ±0,8 | ±1,2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Desenho: Milton Pereira</p> <p>Responsável: Milton Pereira</p> <p>SERVICO/PROJETO</p> | | | <p>GRUPO</p> <p>MAQFER</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>MESA DE RETIFICACAO</p> | | | <p>DESENHO</p> <p>100-0968</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | |





| | | | |
|--------|-------------|------|---------------|
| 01 | Eixo 2 | 06 | Aco inox |
| 01 | Eixo 1 | 05 | Aco inox |
| QUANT. | DENOMINAÇÃO | PEÇA | ESPECIFICAÇÃO |

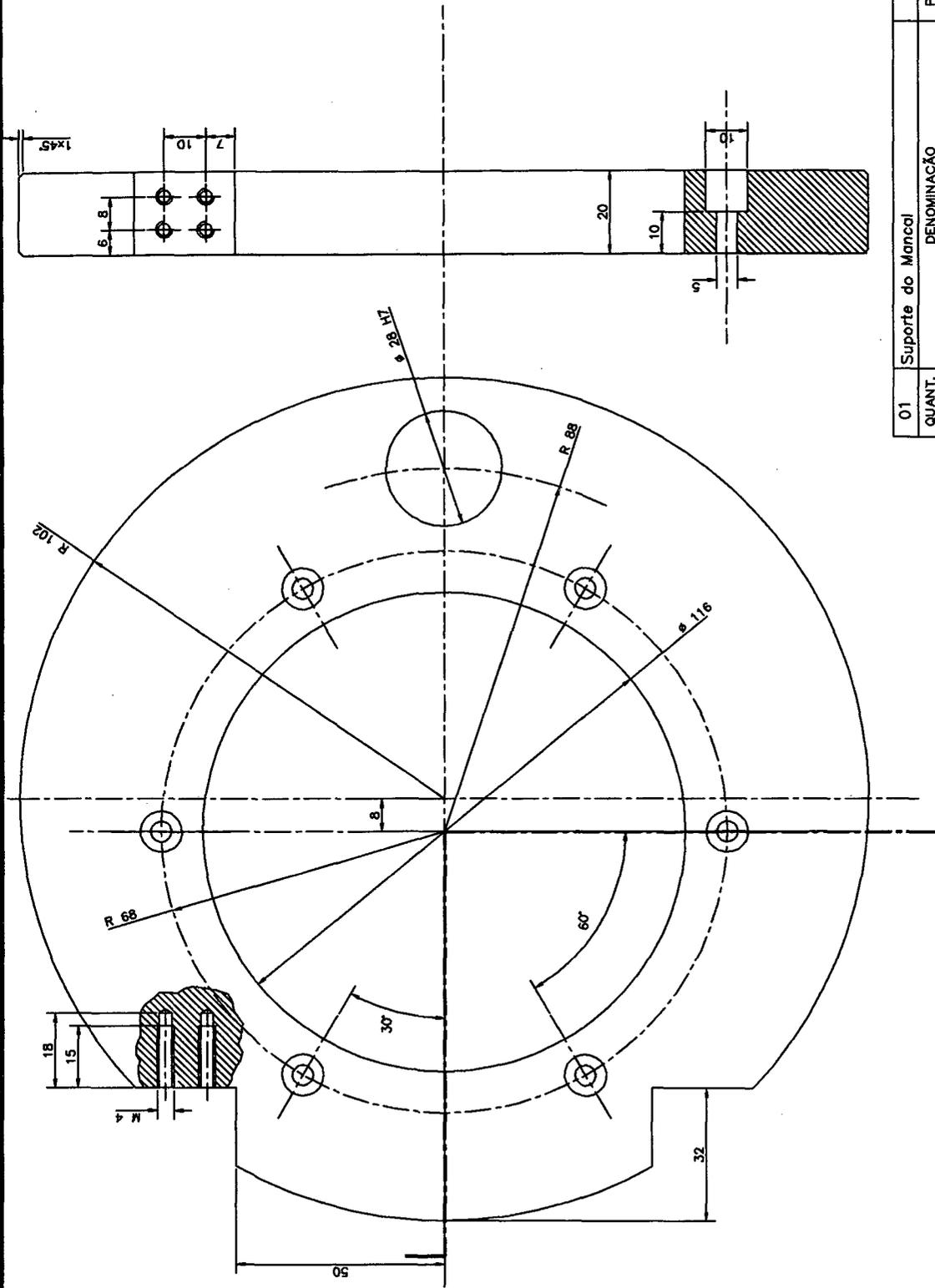


| | | | | | |
|--|------|------|----------------|------|------|
| DESVIOS MEDIOS ADMISSÍVEIS PARA MEDIDAS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS - (DIN 7165) | | | | | |
| 1 | 6 | 30 | 120 | 315 | 1000 |
| A | A | A | A | A | A |
| ±0,1 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 | ±0,8 | ±1,2 |
| Desenho: Milton Pereira | | | Data: 21/03/97 | | |
| Responsável: Milton Pereira | | | Data: 21/03/97 | | |

| | |
|--------|--------|
| ESCALA | 1:1 |
| GRUPO | MAQFER |

| | | | |
|-----------------|---------------------|---------|----------|
| SERVIÇO/PROJETO | MESA DE RETIFICACAO | DESENHO | 100-0969 |
|-----------------|---------------------|---------|----------|

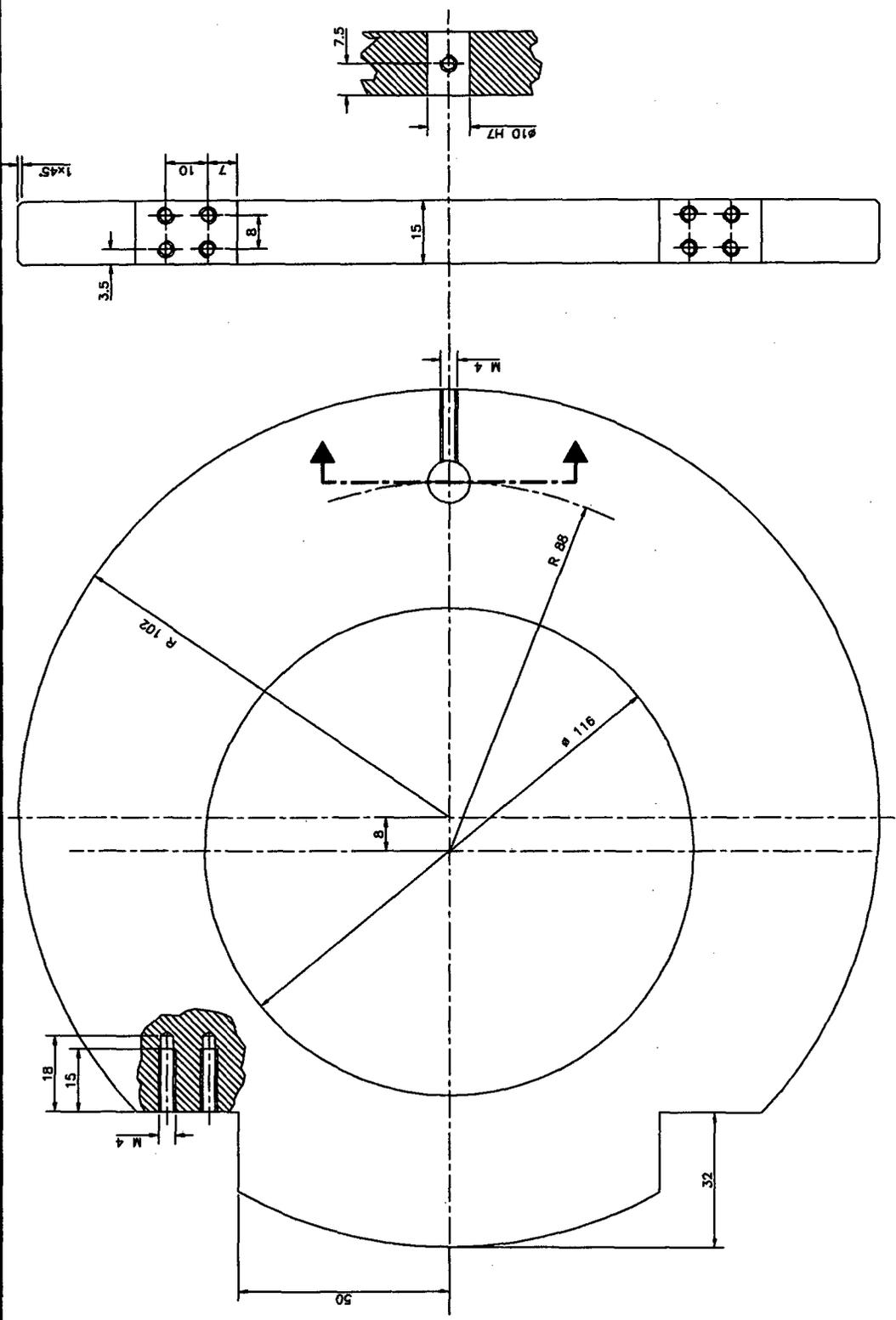
07



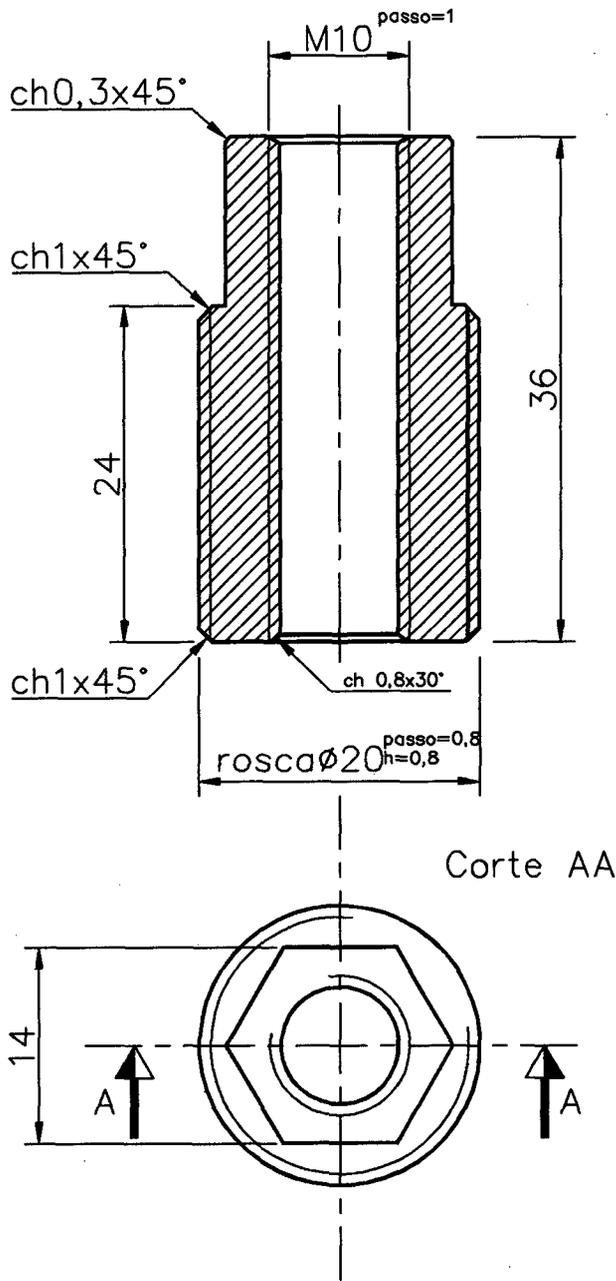
| | | | |
|--|-------------------|--------|----------------|
| 01 | 07 | Bronze | ESPECIFICAÇÃO |
| 01 | 07 | Bronze | ESPECIFICAÇÃO |
| QUANT. | DENOMINAÇÃO | | ESCALA |
| | Suporte do Mancal | | 1:1 |
| | PEÇA | | GRUPO |
| | MAQFER | | |
| DESIGNS MÉDIOS ADMISSÍVEIS PARA MEDIDAS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS - (DIN 7165) | | | |
| 1 | 6 | 30 | 120 |
| A | A | A | A |
| ±0,1 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 |
| 1000 | 1000 | 2000 | ±1,2 |
| Desenho: Milton Pereira | | | Data: 08/04/97 |
| Responsável: Milton Pereira | | | Data: 08/04/97 |
| SERVIÇO/PROJETO | | | DESENHO |
| MESA DE RETIFICACAO | | | 100-0970 |



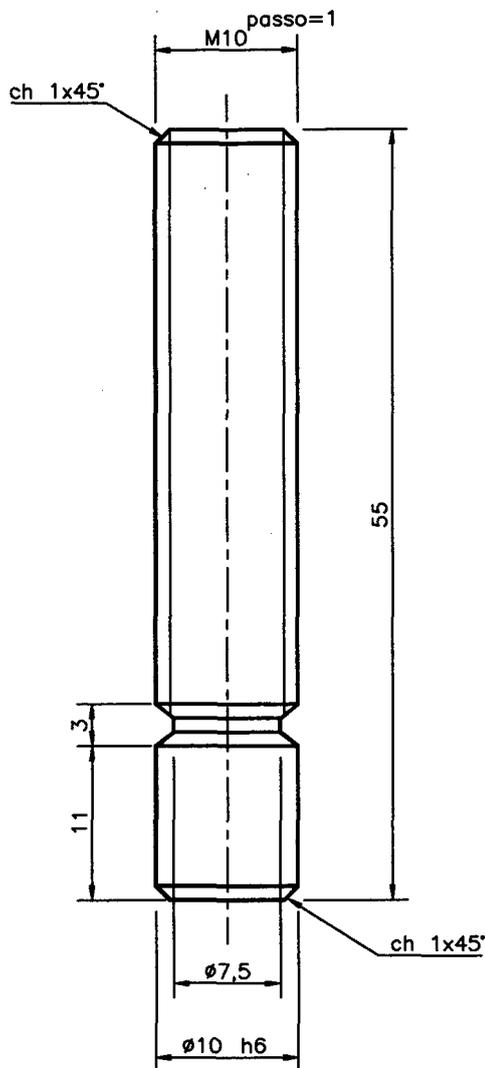
08



| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|------|-------------|-----------------------|--------|--------------------------------|---|---|----|-----|-----|------|---|---|---|---|---|---|------|------|------|------|------|------|
| 01 | Base | DENOMINAÇÃO | 08 | Bronze | ESPECIFICAÇÃO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| QUANT. | | PEÇA | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>DESVIOS MEDIOS ADMISSÍVEIS PARA MEDIDAS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS - (DIN 7185)</p> <table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>6</td> <td>30</td> <td>120</td> <td>315</td> <td>1000</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>A</td> </tr> <tr> <td>±0.1</td> <td>±0.2</td> <td>±0.3</td> <td>±0.5</td> <td>±0.8</td> <td>±1.2</td> </tr> </table> | | | | | | 1 | 6 | 30 | 120 | 315 | 1000 | A | A | A | A | A | A | ±0.1 | ±0.2 | ±0.3 | ±0.5 | ±0.8 | ±1.2 |
| 1 | 6 | 30 | 120 | 315 | 1000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A | A | A | A | A | A | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ±0.1 | ±0.2 | ±0.3 | ±0.5 | ±0.8 | ±1.2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>ESCALA 1:1</p> <p>GRUPO MAQFER</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Desenho: Milton Pereira</p> | | | <p>Data: 08/04/97</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Responsável: Milton Pereira</p> | | | <p>Data: 08/04/97</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>SERVIÇO/PROJETO</p> <p>LMP LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PRECISÃO</p> <p>MESA DE RETIFICAÇÃO</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | <p>DESENHO</p> <p>100-0971</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

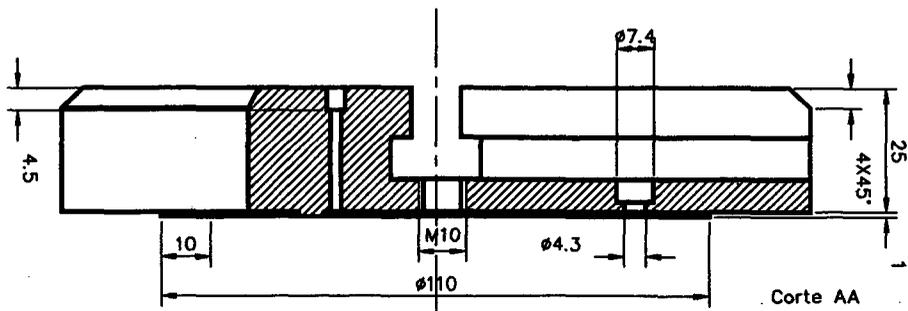


| | | | | |
|---|--|--------------------|---------------------|---------------------|
| 04 | Parafuso diferencial externo | 10 | Aco INOX | |
| QUANT. | DENOMINAÇÃO | PEÇA | ESPECIFICAÇÃO | |
|  <p>LMP LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PRECISÃO</p> | DESVIOS MEDIOS ADMISSÍVEIS PARA MEDIDAS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS - (DIN 7165) | | ESCALA 2:1 | |
| | 1 A 6 ±0,1 | 6 A 30 ±0,2 | 30 A 120 ±0,3 | GRUPO MAQFER |
| | 120 A 315 ±0,5 | 315 A 1000 ±0,8 | 1000 A 2000 ±1,2 | Data: 06/97 |
| | Desenho: Helio | | Data: | DESENHO 100-0973 |
| Responsavel: Milton | | | Data: | |
| SERVIÇO/PROJETO MESA DE RETIFICACAO | | | DESENHO 100-0973 | |

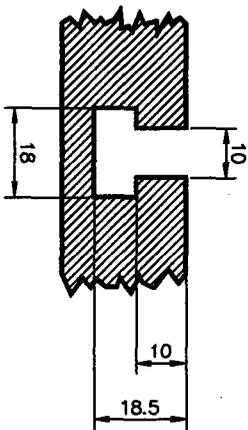


Ajuste deslizante: $\phi 10\ h6\ \begin{matrix} 0 \\ -9 \end{matrix}\ \mu m$

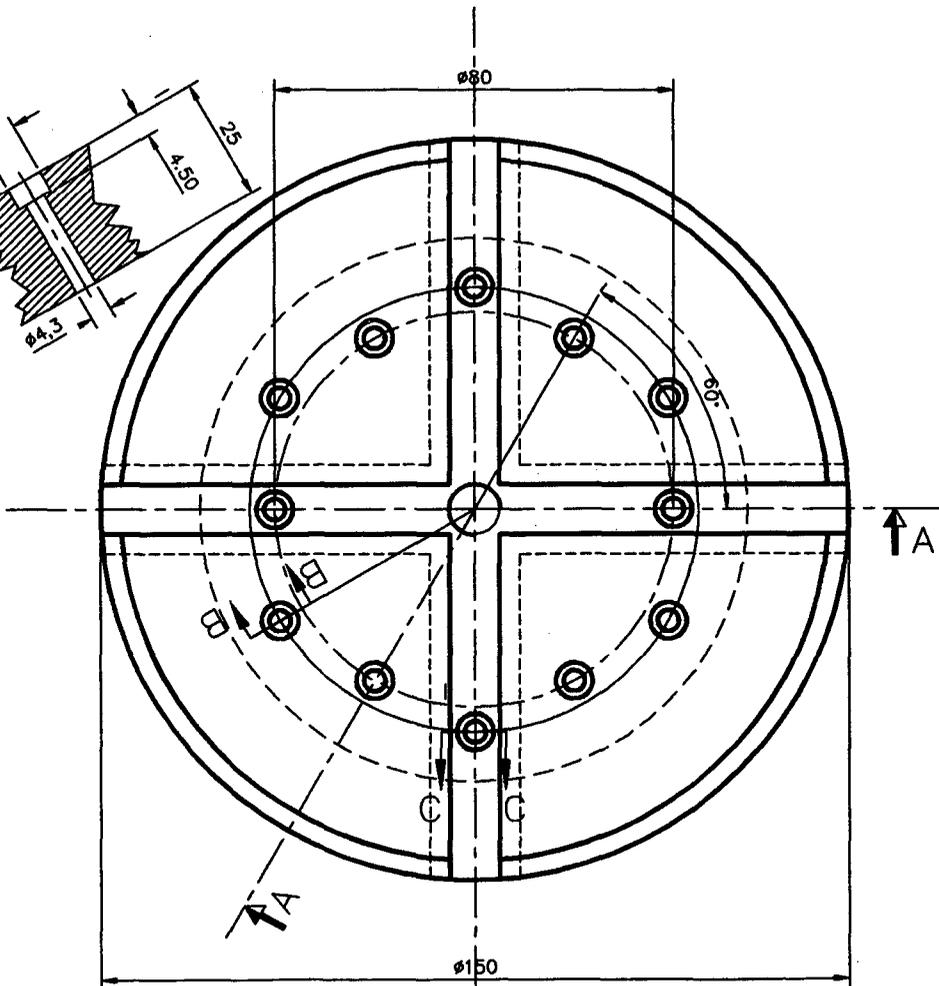
| | | | | |
|---|--|------------------|-------------------|---------------------|
| 04 | Parafuso diferencial interno | 11 | Aco INOX | |
| QUANT. | DENOMINAÇÃO | PEÇA | ESPECIFICAÇÃO | |
|  <p>LMP LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PRECISÃO</p> | DESVIOS MEDIOS ADMISSÍVEIS PARA MEDIDAS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS - (DIN 7165) | | ESCALA 2:1 | |
| | 1 A ±0,1 | 6 A ±0,2 | 30 A ±0,3 | GRUPO MAQFER |
| | 120 A ±0,5 | 315 A ±0,8 | 1000 A ±1,2 | |
| | Desenho: Milton Pereira | Data: 27/06/97 | | |
| Responsavel: Milton Pereira | Data: 21/03/97 | | | |
| SERVIÇO/PROJETO | | | DESENHO | |
| MESA DE RETIFICACAO | | | 100-0974 | |



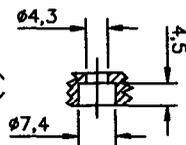
DETALHE DA RANHURA T



CORTE BB



CORTE CC



| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------|----------------|---------------|------|------|----|-----|-----|------|---|---|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 01 | MESA C/ RANHURA T | 3 | ESPECIFICAÇÃO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| QUANT. | DENOMINAÇÃO | PEÇA | ESPECIFICAÇÃO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>DESMOS MEDIOS ADMISSÍVEIS PARA MEDIDAS SEM TOLERÂNCIAS INDICADAS - (DIN 7185)</p> <table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>A</td> <td>30</td> <td>120</td> <td>315</td> <td>1000</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>A</td> <td>120</td> <td>315</td> <td>1000</td> <td>2000</td> </tr> <tr> <td>±0.1</td> <td>±0.2</td> <td>±0.3</td> <td>±0.5</td> <td>±0.8</td> <td>±1.2</td> </tr> </table> | | | | 1 | A | 30 | 120 | 315 | 1000 | 6 | A | 120 | 315 | 1000 | 2000 | ±0.1 | ±0.2 | ±0.3 | ±0.5 | ±0.8 | ±1.2 |
| 1 | A | 30 | 120 | 315 | 1000 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | A | 120 | 315 | 1000 | 2000 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ±0.1 | ±0.2 | ±0.3 | ±0.5 | ±0.8 | ±1.2 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Desenho: Fabrício Belli | | Data: 21/06/94 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Responsável: Rodrigo L. St. | | Data: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SERVIÇO/PROJETO | | | M.FERRAMENTAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| LMP LABORATÓRIO DE MECÂNICA DE PRECISÃO | | | DESENHO | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ESCALA | | | 1:1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |