Campus de São Carlos

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MANCAIS
AEROSTÁTICOS COM RESTRITOR DE
ORIFÍCIO E COM ELEMENTO CERÂMICO
POROSO**

RENATO TSUKAMOTO

Prof. Dr. Jaime Gilberto Duduch

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MANCAIS AEROSTÁTICOS
COM RESTRITOR DE ORIFÍCIO E COM ELEMENTO CERÂMICO
POROSO**

RENATO TSUKAMOTO, Engº. Mecânico

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100047248

São Carlos

- 2003 -

Class.	TESE-EESC ✓
Cutl.	6303
Tombe	T059/04
Sysno	1361906

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

T882e Tsukamoto, Renato
Estudo comparativo entre mancais aerostáticos com
restritor de orifício e com elemento cerâmico poroso /
Renato Tsukamoto. -- São Carlos, 2003.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Gilberto Duduch.

1. Usinagem de ultra-precisão. 2. Mancal aerostático.
3. Restritor. 4. Mancal aerostático poroso. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RENATO TSUKAMOTO**

Dissertação defendida e julgada em 06-11-2003 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Assoc. **JAIME GILBERTO DUDUCH (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **RENATO GOULART JASINEVICIUS**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **JUAN CARLOS CAMPOS RUBIO**
(Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG)

Aprovado

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALHURY**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico esta conquista aos meus pais
que são meu exemplo de
trabalho e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Nossa Senhora por ter intercedido junto a Deus por todas as bênçãos.

Ao Prof. Dr. Jaime Gilberto Duduch pela orientação, auxílio, confiança e amizade.

Aos amigos de laboratório, Helder, Rogério, Pagoto e Gustavo, pelo ambiente agradável de trabalho e principalmente a Luciana por ter me incentivado a vir para São Carlos, por sua amizade e ajuda em todos os momentos.

Aos professores doutores e amigos Juan Carlos Rubio e Renato Jascinevicius pelas sugestões e discussões.

Aos amigos de república de São Carlos, Carim, Douglas, Fábio, Kiko, Manza e Fernando, pelo convívio amigável e solidário e a D. Filomena por seus cuidados.

Aos colegas de trabalho, em Taubaté, João, Flávio, Lydia, Felipe, Glauco, Jorge, Karina, Geneci, Graziela, Rodrigo e André.

A todos os professores da EESC pelas aulas ministradas.

Ao pessoal das bibliotecas pelo atendimento e educação.

Às meninas da secretaria, Ana Paula e Beth, pela ajuda.

Às palavras de incentivo dos meus tios Valdemar, Milton e Tô.

Aos professores do CNA-São Carlos pelo conhecimento transmitido.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Ao Curti, que me liberou do serviço quando precisei e aos amigos Adilson, Fábio e Sebastião.

Ao Tatá por me abrigar quando cheguei em Pompéia.

Aos novos companheiros de república em Pompéia Humberto e Ádamo por me receberem e pelo convívio.

Ao Ricardo pela colaboração na finalização do trabalho.

A minha namorada Renata pelo amor, carinho e confiança.

E especialmente aos meus pais e irmã pelo incentivo e apoio.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	iv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 – Introdução	4
2.2- Mancais de Rolamentos.....	5
2.3- Mancais hidrodinâmicos.....	7
2.4 – Mancais hidrostáticos.....	11
2.5– Mancais aerostáticos.....	14
2.5.1 – Introdução	14
2.5.2 - Propriedades gerais de mancais a gás externamente pressurizados	15
2.5.3 – Características dos mancais aerostáticos	16
Limites de velocidades e acelerações:.....	16
Faixa de movimentos:	17
Cargas solicitadas:	17
Exatidão:	17
Repetibilidade:.....	17
Resolução:	18
Pré-Carga:.....	18
Rigidez:	18
Vibração e resistência de contato:	18
Atrito:.....	18

Desempenho térmico:	19
Tamanho e configuração:.....	19
Equipamentos auxiliares:	19
Manutenção:.....	19
Compatibilidade de materiais:	20
Custo e vida dos mancais:	20
Condições gerais de operação:.....	20
Filtragem:	21
Breakers:.....	21
Sistema de descarga:.....	21
Vapor de óleo:	22
2.5.4 – Equações básicas dos mancais aerostáticos	22
2.6 - Mancais Porosos.....	28
2.6.1 – Introdução	28
2.6.2 – Permeabilidade:.....	29
2.6.3 – Medição da Porosidade:.....	30
2.6.4 – Medição da permeabilidade:	30
2.6.5 – Características estáticas	32
2.6.6 – Características Dinâmicas:.....	33
2.6.7 – Técnicas de produção de cerâmicas porosas:	35
CAPÍTULO 3	38
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	38
3.1- Planejamento de experimentos	38
3.2 – Características e preparação do restritor cerâmico	39
3.3 – A Ferramenta de diamante: características geométricas	40
3.4 – Mancal axial aerostático	41
CAPÍTULO 4	43
4. RESULTADOS	43
CAPÍTULO 5	48
5. Conclusões.....	48
6. Sugestões para trabalhos futuros.....	50
BIBLIOGRAFIA	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de guias e mancais (Weck, 1984).

Figura 2 – Formação de película de óleo em um mancal radial (Mobil, 1979).

Figura 3 – Esquema de formação da película de óleo espessa em mancal hidrodinâmico de bronze sujeito a carga de sentido uniforme (Mobil, 1979).

Figura 4 – Comportamento da espessura de película, Y , do fluido em função do produto da viscosidade e da rotação pela carga, $\mu N/W$ (Mobil, 1979).

Figura 5 – Mancal hidrostático de sapata circular com restritor de orifício.

Figura 6 – O fluxo ocorre na direção x pela pressão P_1 ser maior que P_2 . A distribuição de velocidade na seção transversal do filme segue uma curva parabólica e o gás em contato com cada placa é estacionário (Powell, 1970).

Figura 7 – Simples mancal axial aerostático, com furo central de alimentação e bolsão (Powell, 1970).

Figura 8 - Diagrama do dispositivo para medida de permeabilidade. (KWAN, 1996)

Figura 9 – Gráfico ilustrativo para determinação dos coeficientes de permeabilidade.

Figura 10 – Capacidade de carga adimensional x Espessura de filme adimensional (Fourka, 1997).

Figura 11 – Rigidez adimensional x Espessura de filme adimensional (Fourka, 1997).

Figura 12 – Rigidez adimensional x Vazão adimensional (Fourka, 1997).

Figura 13 – Microscopia da cerâmica de alumina utilizada como restritor poroso.

Figura 14 – Macroscopia da cerâmica de alumina utilizada como restritor poroso.

Figura 15 – Ilustração do restritor cerâmico do mancal aerostático.

Figura 16 – Amostra de uma peça fixada. A fixação no eixo-árvore se dá através de vácuo.

Figura 17 – Ilustração do mancal com restritor de cerâmica porosa.

Figura 18 – Manômetro regulador de pressão.

Figura 19 – O mancal aerostático e o sistema de aquisição de sinal.

Figura 20 – Gráfico do carregamento suportado em função da espessura do filme.

Figura 21 – Gráfico das derivadas primeiras das curvas de capacidade de carga, equivalente à rigidez dos mancais.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos tipos de mancais (Cheng & Rowe, 1995).

Tabela 2 – Comparação dos restritores usados em mancais hidrostáticos (Cheng & Rowe, 1995).

Tabela 3 – Características geométricas da ferramenta de diamante CO30MG.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios do mancal com restritor de orifício.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios do mancal com restritor poroso.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CMM – Centro de Manufatura Mecânica

LVDT – Linear Variable Differential Transducer

CNC – Comando Numérico Computadorizado

HIPing – Hot Isostatic Pressing

LISTA DE SÍMBOLOS

A_p	– área do restritor poroso
d	– diâmetro do eixo
h	– folga
K	– permeabilidade
m	– vazão em massa
N	– rotação
P	– pressão
P_s	– pressão de alimentação
P_r	– pressão no bolsão
P_a	– pressão atmosférica
Q_m	– vazão média
r_p	– raio de ponta
R	– constante de gases
T	– temperatura
u	– velocidade do fluido
W	– carga
y	– espessura da película
Z_p	– espessura do restritor poroso
α	– ângulo de folga
ΔP	– variação da pressão
Φ_v	– permeabilidade viscosa
Φ_i	– permeabilidade inercial
γ	– ângulo de saída
η	– viscosidade do ar
ρ_m	– densidade do ar a pressão atmosférica
μ	– viscosidade

RESUMO

TSUKAMOTO, R. (2003). *Estudo comparativo entre mancais aerostáticos com restritor de orifício e com elemento cerâmico poroso*. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

A fabricação de ultraprecisão – com suas dimensões atingindo níveis submicrométricos – tem-se mostrado um campo de trabalho que exige combinação do que há de mais avançado nas áreas de materiais, metrologia e controle. Para alcançar tais níveis de precisão, é necessário que se garanta excelente desempenho de cada um dos componentes e/ou subsistemas das máquinas. Sendo o par tribológico mancal – eixo-árvore elemento vital para o desempenho de uma máquina ferramenta, e baseado em estudos recentes que mostram que mancais convencionais de rolamento estão rapidamente atingindo seu limite, o estudo dos mancais pressurizados externamente se impõe. Com a crescente demanda por rigidez e precisão de giro, tais mancais tem-se tornado solução convencional ao contrário de condição especial. Os mancais aerostáticos, em particular, apresentam alta precisão de giro, baixa geração de calor, ausência de desgaste, alto amortecimento e limpeza. Essas características os tornam bastantes atrativos em ambientes de fabricação de ultraprecisão, especialmente na indústria óptica e eletrônica, como por exemplo, na fabricação de semicondutores. O presente trabalho objetiva a comparação entre os comportamentos de dois mancais aerostáticos, com restritor do tipo orifício e com material cerâmico poroso, em relação as capacidade de carga e rigidez. Os resultados indicam a superioridade do mancal com restritor poroso quanto à capacidade de carga e também em relação à rigidez.

Palavras-chave: usinagem de ultraprecisão, mancal aerostático, restritor e mancal aerostático poroso.

ABSTRACT

TSUKAMOTO, R. (2003). *Comparative survey between aerostatics bearings with opening restrictor and with porous ceramic element*. M. Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

Ultra-precision machining – whose dimensions can reach sub-micrometric levels – has been shown to be an area of work requiring a combination of the best of materials, metrology and control. To achieve such accuracy levels, it is necessary to guarantee excellent performance of every component and/or machine subsystems. Being the tribological associated pair bearing/spindle a vital element for the performance of a machine tool, and based on recent researches that show that rolling bearings are reaching their limit very quickly, there has been an increasing demand for aerostatic bearings. These present good characteristics of stiffness, radial and axial accuracy, low heating generation, wear resistance and cleanliness. These features make them quite attractive in ultra-precision manufacturing environments, specially in the optics and electronics industries, such as in the manufacturing of semiconductors. The present work compares the stiffness and load carrying capacity of orifice restrictor and porous ceramic aerostatic bearings. The results show the superiority of porous aerostatic bearings as to loading capacity as well stiffness.

Key-words: ultra-precision machining; aerostatic bearing; porous aerostatic bearing

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Na fabricação de componentes de ultraprecisão para aplicações em equipamentos meca-opto-eletrônicos são necessárias máquinas que apresentem rigidez e precisão de posicionamento tais que garantam qualidades nanométricas de tolerâncias e acabamentos. Cada um dos elementos mecânicos básicos que compõem uma máquina de ultraprecisão contribui para a qualidade da usinagem e devem apresentar precisão, rigidez estática e dinâmica e estabilidade dimensional elevadas para minimizar toda e qualquer fonte de erro. A influência direta destes erros no desempenho torna necessário o estudo de cada um dos principais componentes de uma máquina-ferramenta isoladamente e a influência no comportamento global da máquina, a saber:

- a) Mancal e eixo árvore;
- b) Guias e mesas;
- c) Elementos de transmissão;
- d) Estrutura (Purquério, 1994).

O par tribológico mancal – eixo-árvore pode ser considerado como o de maior flexibilidade da máquina ferramenta, conduzindo a efeitos diretos sobre a conformidade dimensional e qualidade do acabamento superficial do produto, devido à curvatura elástica do eixo-árvore e deflexão dos mancais (Roblee, 1990). Para minimizar tais efeitos, os mancais e os eixos-árvores devem satisfazer os requisitos de repetibilidade de movimento, capacidade de carga e de rigidez compatíveis com a exatidão esperada.

Projetos e desenvolvimentos de máquinas são realizados a ponto de conseguir-se usinar peças cujos tamanhos vão desde alguns milímetros de diâmetro até espelhos de telescópios de 64 polegadas de diâmetro com tolerâncias nanométricas (McKeown, 1987).

Confrontando as exigências com as características dos diversos tipos de mancais chega-se a tabela 1, feita por Cheng & Rowe em 1995.

Observando-se a tabela, nota-se que a tradicional preferência pelos mancais de elementos rolantes é devida ao seu baixo custo e alta rigidez, porém apresentam limites de aplicação quando se deseja alta velocidade, baixo atrito, repetibilidade de movimento, temperatura e aplicações especiais. Os mancais com lubrificação são capazes, por sua vez, de oferecer operação suave, porém exibem elevada resistência ao atrito viscoso, resultando, nas velocidades altas, problemas de aquecimento. Necessitam, também, de lubrificantes que suportem a severidade do ambiente. Portanto, grande atenção tem sido concentrada nos mancais que empregam o ar como lubrificante – os mancais aerostáticos (Balestrero, 1997).

Os mancais aerostáticos podem proporcionar, além de alta rigidez e precisão de movimento, as seguintes vantagens: indiferença com relação à variação de temperatura, nível elevado de amortecimento, operação em altas velocidades, desgaste nulo e capacidade de suportar cargas radiais, axiais e combinadas, além de satisfazer normalmente as formas construtivas cilíndricas, planas circulares e anulares (Cheng & Rowe, 1995; Rowe, 1991).

Observando-se a tabela 1, verifica-se que os mancais aerostáticos ainda têm suas aplicações limitadas pelas seguintes variáveis: limitação de espaço, custos operacionais e de produção, manutenção, facilidade de projeto e de fabricação.

Assim, justifica-se a qualquer tempo a investigação, seja ela teórica ou experimental, de novas possibilidades que visem a melhoria da qualidade dos projetos de máquinas, através da otimização do projeto de seus elementos constituintes particularmente do par tribológico mancal aerostático – eixo-árvore (Balestrero, 1997).

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo comparativo entre um mancal aerostático poroso e um mancal de orifício.

Tabela 1 – Comparação dos tipos de mancais (Cheng & Rowe, 1995).

Tipos de Mancais	Elementos Rolantes	Atrito Seco	Metal Poroso	Princípios Hidrodinâmicos		Pressurizados Externamente	
				Líquidos	Aerodinâmicos	Aerostáticos	Hidrostáticos
Fatores Operacionais							
Alta Temp.	**	***	*	*	****	****	*
Baixa Temp.	**	***	*	*	****	****	**
Vibrações	*	**	**	***	**	****	****
Espaço	****	****	***	***	**	*	**
Sujeira/Poeira	*	**	*	***	*	****	***
Condições de Umidade	*	**	***	****	***	***	****
Custos Operacionais	***	***	***	**	****	**	*
Custos de Produção	***	****	***	**	**	*	*
Precisão de Mov. Radial	**	*	**	***	***	****	****
Rigidez / Tamanho	***	**	*	***	**	***	****
Cap. de Carga/Taman.	***	**	*	***	**	***	****
Amorteci-mento	*	**	**	***	*	***	****
Alta Velocidade	***	*	*	**	****	****	****
Controle Central	**	*	*	**	***	****	****
Aumento de Temp.	**	*	**	**	****	****	***
Durabilidade	***	**	**	***	**	****	****
Manutenção	***	****	***	**	**	*	*
Torque de Partida	***	*	**	**	**	****	****
Torque de Operação	***	*	**	**	****	****	**
Ruído	*	**	****	****	****	***	**
Partidas / Paradas	****	****	***	**	*	****	****
Dimensões Externas	****	****	****	**	***	*	**
Facilidade de Projeto	**	****	***	*	*	**	***
Facilidade de Fabricação	***	****	***	*	*	*	**
Disponibilida de de Peças Normalizadas	****	**	***	*	#	#	#
Contaminação do Meio/Prod.	**	**	**	*	****	****	*
Vácuo	*	****	*	*	#	#	*
Variações do Sentido de Rotação	****	****	**	**	*	****	****
Lubrificação	***	****	****	*	****	***	**
Radiação	**	***	*	*	****	****	*

**** excelente *** bom ** normal * pobre # não considerado

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Introdução

A função básica dos mancais é permitir o movimento entre superfícies, atualmente os tipos de mancais mais conhecidos são mancais de rolamentos, cujo movimento é permitido por elementos rolantes (esfera, cilindros, etc); mancais de contato direto, onde o coeficiente de atrito dos materiais dos mancais é suficientemente baixo para permitir o movimento relativo entre as partes; mancais de filmes fluídicos, que possuem uma película fluídica entre as partes para minimizar o atrito; mancais pressurizados externamente, aerostáticos ou hidrostáticos, o atrito é eliminado pela introdução de pressão no mancal; e mancais magnéticos, cujo atrito é eliminado pela repulsão magnética causada pelas polaridades. Portanto os mancais podem ser classificados quanto aos princípios físicos.

A figura 1 mostra esquematicamente os mancais e guias mais empregados:

- Mancal hidrodinâmico;
- Mancal hidrostático;
- Mancal aerostático;
- Mancal de rolamento.

Figura 1 – Tipos de guias e mancais (Weck, 1984).

2.2- Mancais de Rolamentos

Os mancais de rolamentos são largamente aplicados na prática, devido a vantagens como: as pequenas forças de atrito, não apresenta problema de escorregamento (stick-slip) ou de instalação e disponibilidade imediata devido à padronização dos elementos rolantes. Tendo como principal desvantagem o baixo amortecimento na direção normal ao movimento (Weck, 1984).

A precisão de operação de um rolamento depende da qualidade das superfícies, da precisão dimensional e geométrica dos elementos rolantes. Os mancais devem estar livres de umidade e sujeira, que causam ferrugem e desgastes. Devem estar protegidos, lubrificados e selados. Sendo todas as causas de defeitos externas eliminadas, a vida dos rolamentos passa a ser limitada apenas pela fadiga do material, devido às tensões repetitivas das rotações. A vida é medida em número de revoluções ou em número de horas de operação a uma certa velocidade de rotação (Palmgren, 1959).

Segundo Zampese (1980) a lubrificação dos rolamentos exerce três funções fundamentais:

- 1 – Lubrificação para separação entre as superfícies em contato e redução do atrito;
- 2 – Transferência de calor;
- 3 – Proteção contra corrosão.

Como mostrado na tabela 1, dentre as principais vantagens dos mancais de rolamentos podem ser apresentadas as seguintes:

- alto nível de padronização;
- intercambialidade devido à padronização;
- disponibilidade de catálogos e desenhos indexados para auxiliar na seleção;
- requerem pequena largura;
- alta capacidade de carga, mesmo parados, porque o filme lubrificante não precisa ser primeiro estabilizado;
- permitem altas flutuações no carregamento e nas velocidades rotacionais;
- em alguns casos, mancais radiais podem agir como mancais axiais;
- a ação do rolamento leva a um atrito mínimo ($\mu=0,0015$);
- baixa perda de energia e temperatura nos mancais;
- requerem pouca manutenção, quando corretamente instalados;
- precisão de giro e rigidez podem ser melhoradas pela pré-carga;

Entretanto Weck (1984) também apresenta algumas características negativas, tais como:

- problemas de lubrificação e de resfriamento a altas velocidades rotacionais;
- redução da capacidade de carga a altas velocidades rotacionais;
- necessidade de largo espaço radial;
- são pesados;
- alto custo para mancais especiais;
- vida limitada se sobrecarregado (crateramento);
- geram vibrações e ruídos;
- compensação da força centrífuga no caso de mancais radiais bem como inclinados e de finos cilindros.

Quando um rolamento é carregado, ocorre internamente uma deformação. Torna-se então importante conhecer esta deformação, pois o deslocamento total (radial ou axial) do eixo é a soma da deformação mais as folgas internas do rolamento (Zampese, 1980).

Os mancais são produzidos com uma folga corresponde ao deslocamento de uma posição extrema a outra quando o rolamento não está submetido à carga, dependendo da direção pode ser radial ou axial e é dividida em 5 grupos, de C_1 à C_5 . Após a montagem do rolamento a folga diminui, devido à expansão elástica do anel interno e à compressão do anel externo e geralmente quando o rolamento está girando ocorre uma segunda, por causa do aumento na temperatura do eixo durante a rotação ou no caso de altas velocidades por causa da expansão do anel interno devido à força centrífuga.

Particularmente uma dificuldade para os mancais de rolamentos, é a de manter alta precisão de giro quando submetidos a cargas e a um amplo campo de velocidades. Para alcançar certas características, mancais de rolamentos especiais têm sido desenvolvidos para a construção de máquinas-ferramenta. Distingue-se dos modelos tradicionais por seu alto grau de precisão, rigidez e baixo atrito, que eliminam os problemas de expansão térmica, além de outras características especiais. Naturalmente, o uso de alta precisão em mancais só é efetivo se os mancais forem corretamente montados (Weck, 1984).

O emprego de mancais de rolamento em máquinas de ultraprecisão fica limitado às interferências de vibrações externas, amortecimento, ruído, problemas de lubrificação, resfriamento, precisão de giro e capacidade de carga a altas velocidades.

2.3- Mancais hidrodinâmicos

A principal aplicação dos mancais hidrodinâmicos tem sido no campo da construção pesada e para máquinas-ferramentas, tais como tornos e retíficas. Nestes casos os eixos são sustentados pela pressão desenvolvida devido ao arraste do óleo para dentro de uma cunha ou ranhura.

Por exemplo, a sustentação de um eixo num mancal radial, figura 2, é fornecida pelo deslocamento das camadas de óleo no espaço existente entre o eixo e o mancal, cada uma delas é arrastada pela que se encontra imediatamente acima, por efeito do atrito interno do fluido, que por sua vez tem origem na viscosidade do óleo. A força que desloca o óleo para fora do espaço C é a mesma que o impele para dentro, mas como a área de saída B é menor do que a da entrada A, o fluxo líquido encontrará maior resistência em B. Por conseqüência, há uma tendência maior de compressão de óleo

neste espaço, do que aquele que pode escapar, aumentando assim a pressão nesta região (Mobil, 1979).

Figura 2 – Formação de película de óleo em um mancal radial (Mobil, 1979).

Na figura 3, é apresentada esquematicamente a formação da película fluida de óleo em mancal de bronze sujeito à carga de sentido uniforme. Na figura. 3a, o eixo está parado e o óleo remanescente escorreu para o fundo do mancal, formando uma finíssima película, mas devido a irregularidades de usinagem das superfícies estão provavelmente em contato direto. Na figura. 3b, o óleo começa a correr preenchendo a folga, e o eixo começa a girar, apesar do elevado atrito momentâneo, devido ao contato metálico do eixo com a bucha, o eixo tem tendência a subir para a esquerda dentro do mancal, porém girando agora sobre uma camada mais espessa de óleo que reduz o atrito e opõe-se à tendência de subir, com a linha de contato à esquerda, o óleo é arrastado para o espaço em forma de cunha na parte inferior esquerda do mancal e na medida que a velocidade aumenta, mais óleo é arrastado através da cunha convergente, aumento a pressão nesta região, fazendo com que o eixo vá para a direita e eleve-se, figura 3c; À plena velocidade, o eixo fica apoiado sobre uma película de óleo espessa, tomando finalmente a posição ilustrada na figura 3d, ou seja, no lado oposto ao que se encontrava quando começou a girar (Norton, 1942).

Figura 3 –Esquema de formação da película de óleo espessa em mancal hidrodinâmico de bronze sujeito a carga de sentido uniforme:

Fig. (3a) máquina parada;

Fig. (3b) partida da máquina;

Fig. (3c) fase de transição de velocidades e estabelecimento do regime de funcionamento;

Fig. (3d) máquina em velocidade plena (Norton, 1942).

A folga ou luz dos mancais é proporcional ao diâmetro dos eixos, d , em mancais comuns esta folga varia de $0,0006.d$ a $0,001.d$, sendo um pouco menor para mancais de precisão e consideravelmente maior para mancais de máquinas pesadas.

Ainda segundo Norton (1942), os materiais dos mancais hidrodinâmicos devem possuir as seguintes características:

- resistência à compressão;
- resistência à fadiga;
- resistência à corrosão;
- ductilidade;

- capacidade de adaptação a irregularidades e desalinhamentos do eixo e ainda de envolver partículas abrasivas;

Para atender tais requisitos, os materiais mais usados são as ligas de cobre-chumbo, de alumínio, cádmio-prata, carbono-grafite e teflon.

Influência da velocidade e da carga na viscosidade

A espessura de película pode ser adotada como critério do comportamento em serviço dos mancais projetados para trabalhar com lubrificação hidrodinâmica, pois se sabe que se esta se tornar muito fina, não resistirá à carga. A figura 4 abaixo ilustra a relação entre a espessura de película Y em função do fator $\mu N/W$, que é adimensional para viscosidade μ [poises], velocidade N [rotações por segundo] e a carga W [dinas por centímetros quadrados].

Figura 4 -Comportamento da espessura de película, Y , do fluido em função do produto da viscosidade e da rotação pela carga, $\mu N/W$ (MOBIL, 1979).

Assim para um mancal que, com determinada velocidade e carga, tenha de operar com espessura mínima de película Y , deve-se utilizar viscosidade tal que a temperatura de operação atinja um $\mu N/W$ igual a X . Se a viscosidade for demasiadamente baixa, o $\mu N/W$ será menor e a película mais fina e se for excessivamente alta, o $\mu N/W$ será mais elevado e a película mais espessa. Deste modo, quando se aumenta a velocidade de uma máquina cujo ponto operacional seja X , haverá um aumento do $\mu N/W$ e da espessura de película, tornando-se necessária a redução da viscosidade do óleo para a redução do $\mu N/W$ e da espessura de película para os valores de projeto. Igualmente, se houver aumento na carga de um mancal que funcione no ponto X , haverá diminuição do valor do $\mu N/W$ e da espessura de película, tornando-se

necessário o aumento da viscosidade do óleo para elevar o $\mu\text{N}/\text{W}$ e a espessura de película para os valores de projeto. A deficiência em manter a folga constante e todo o campo de velocidades, como visto na figura 4, torna inviável a aplicação deste tipo de mancal em máquinas de ultraprecisão.

Portanto quanto mais alta for a velocidade, mais baixa deverá ser a viscosidade do óleo e esta deve ser tanto maior quanto mais elevada for a carga a suportar (Mobil, 1979).

2.4 – Mancais hidrostáticos

Como visto na figura 3, para os mancais hidrodinâmicos, quando se inicia o movimento do eixo, pode haver desgaste dos mancais devido ao atrito. Com o emprego de mancais hidrostáticos, consegue-se a eliminação deste atrito inicial, isto porque o óleo lubrificante é pressurizado externamente por uma bomba auxiliar, que pode ser acionada automática ou manualmente. As guias e eixos lubrificados hidrostaticamente são de grande interesse devido à sua incomparável suavidade de movimento mesmo a baixas velocidades, além de boas características de amortecimento de vibrações, larga espessura e alta rigidez do filme fluido, precisão de movimento, atrito inicial nulo e bom desempenho dinâmico.

A separação das superfícies é feita por um fino filme de líquido forçado entre elas sob pressão, mesmo quando o mancal está parado, devido à contínua pressurização.

Como há o fluxo abundante e contínuo de óleo para preencher as folgas dos mancais e muitas vezes para o seu arrefecimento, são necessárias a recuperação e recirculação do óleo para que este processo seja econômico. Desta forma os mancais são montados em circuitos fechados, sendo o óleo que deles escorre conduzido a um tanque ou reservatório, de onde é bombeado novamente para os mancais.

O projeto do orifício restritor, que é um estrangulamento que o fluido sofre antes de ser injetado no filme fluídico, por causa da dissipação de energia e da redução de pressão, é essencial porque a pressão no bolsão, rebaixo que funciona como uma câmara de expansão, pode ser ajustada para balancear a variação da carga aplicada no mancal.

Há vários tipos de restritores. A tabela 2 mostra as vantagens e desvantagens de três tipos de restritores para mancais hidrostáticos.

Tabela 2 – Comparação dos restritores usados em mancais hidrostáticos (Cheng & Rowe, 1995).

TIPO DE RESTRITOR	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Capilar	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicidade na fabricação; - Carga e rigidez independentes da viscosidade do fluido, portanto ao aumento da temperatura; 	<ul style="list-style-type: none"> - Rigidez é uma das mais baixas, porém mais linear;
Orifício	<ul style="list-style-type: none"> - São mais compactos que os capilares e oferecem proporcionalmente maior rigidez; 	<ul style="list-style-type: none"> - Podem sedimentar e entupir, mudando suas características;
Controle constante de fluxo	<ul style="list-style-type: none"> - Maior rigidez e capacidade de carga que qualquer outro tipo; 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto custo para mancais de sapatas múltiplas; - A máxima pressão no mancal é limitada, pelas limitações de alta pressão da bomba e queda de pressão na válvula;
Ranhuras	<ul style="list-style-type: none"> - Podem ter baixa relação L/D e pequeno tamanho; - Carga e rigidez independentes da viscosidade do fluido, portanto ao aumento da temperatura; 	<ul style="list-style-type: none"> - Rigidez é uma das mais baixas, porém mais linear;

A figura 5 mostra um exemplo de mancal hidrostático de sapata circular com um orifício restritor para controle do fluxo. O líquido a uma pressão constante P_s é bombeado para o mancal, passa através do orifício dissipando parte da energia e reduzindo a pressão ao entrar no bolsão da sapata. Este bolsão geralmente é profundo e a pressão pode ser considerada constante em todo o volume, oferecendo pequena resistência ao escoamento. O fluido deixa o mancal através da folga entre as superfícies,

a pequena folga restringe o escoamento e reduz a pressão de saída à pressão ambiente ou atmosférica.

Figura 5 - Mancal hidrostático de sapata circular com restritor de orifício.

Geralmente, em mancais radiais, para que o eixo e o mancal estejam concêntricos, quando o eixo é deslocado do centro a folga entre as superfícies diminui de um lado e aumenta do outro. Do lado em que há a redução da folga, o fluxo diminui e ocorre o aumento da pressão, onde a folga aumenta a pressão diminui. Se o deslocamento do eixo for quase tão grande quanto à folga, a pressão neste lado será quase igual à pressão de alimentação, já no lado oposto ao deslocamento, a restrição ao fluxo diminui a um baixo valor, assim como a pressão. Dessa forma, ambos os lados colaboram para a sustentação da carga aplicada. Um valor da pressão no bolsão próximo da metade da pressão de alimentação, $P_r = 1/2.P_s$, implica máxima capacidade de carga (Cheng & Rowe, 1995).

Van Beek e Segal (1997) usaram um corpo de borracha para suportar a distribuição de pressão excêntrica que ocorre devido à inclinação dos mancais. Desde

que a borracha seja incompressível, ela pode funcionar como um fluido hidráulico comprimido, a borracha comporta-se como sólida em uma direção e como líquido nas outras.

Jain et al, 1997, estudaram os efeitos no desempenho do mancal radial com furos de entrada, devido aos desalinhamentos radiais e axiais, para o modo hidrostático de operação. O mancal pode estar imprópriamente alinhado como resultado de erros na montagem, deflexões do eixo, devido a distorções elásticas e térmicas, cargas não centradas etc. Como consequência, a espessura do fluido em ambas as direções, axial e radial, é modificada, resultando em mudanças nas características de funcionamento do mancal.

Van Beek & Van Ostayen (1997) e Van Beek & Segal (1997) realizaram estudos analíticos e numéricos para mancais hidrostáticos axiais inclinados de sapatas múltiplas. Através da solução analítica concluiu-se que mancais de duas câmaras com orifícios restritores têm propriedades de ajuste próprio um pouco melhores que os com restritores capilares e para mancais de uma câmara o tipo de restritor não influencia. Os coeficientes dos restritores foram calculados de um modo alternativo sem o cálculo do escoamento, ilustrando a boa concordância da solução numérica com a analítica.

Nos mancais axiais hidrostáticos, para a mesma carga aplicada, a película de óleo e a taxa de escoamento aumentam com o aumento da pressão de alimentação. Para grandes cargas é aconselhável o uso de mancais com vários recessos, pois precisam de menores quantidades de lubrificantes. Com o aumento da carga a espessura de película e a taxa de escoamento diminuem, especialmente para bolsões de pequenos raios, portanto para cargas maiores deve-se usar raios maiores (Osman, 1996).

2.5– Mancais aerostáticos

2.5.1 – Introdução

Mancais aerostáticos, devido à viscosidade, empregam um fino filme de ar a alta pressão para suportar cargas. São cinco os tipos básicos de mancais aerostáticos: sapata única, sapatas opostas, radiais, rotativos de escora ou axial e cônico radial/axial.

A história dos mancais aerostáticos é relativamente recente. Uma das primeiras publicações relata as investigações experimentais com filmes finos de ar identificando a existência de um regime de lubrificação (Willis, 1928). O trabalho indicava a

possibilidade da redução do atrito nas máquinas com o uso de um fino filme de ar com alta pressão. O assunto sobre os fluidos dos filmes para mancais cresceu na metade do século XIX, embora a maioria dos trabalhos dava preferência aos líquidos porque sua alta viscosidade permitia grandes folgas e tolerâncias maiores.

Kingsbury em 1897 relatou resultados experimentais com um mancal radial com gás, de seis polegadas de diâmetro, usando ar e nitrogênio como lubrificantes. Este famoso experimento demonstrou que mancais a gás eram possíveis e que o baixo atrito proporcionado por eles poderiam ser postos em prática. Muitas patentes e projetos seguiram-se no começo de 1900. Entretanto, por causa das estreitas tolerâncias requeridas para estes mancais, seu progresso ficou limitado e sua aplicação inviável para a época. Métodos teóricos eram limitados a aproximações das soluções das equações de Reynolds, que é a razão das forças de inércia para as forças de viscosidade, para fluidos incompressíveis. Harrison, 1913, melhorou estas soluções quando desenvolveu uma forma apropriada das equações de Reynolds para fluidos compressíveis.

Após a Segunda Guerra Mundial houve um progresso significativo no desenvolvimento de mancais a ar, isto pode ser atribuído às usinas nucleares e às indústrias bélicas (Purquério, 1991). Os mancais eram procurados para operar onde fosse preciso altas velocidades, baixo atrito, alta rigidez e temperaturas extremas, características que não seriam atendidas por outros tipos de mancais, tais como os de deslizamento, rolamentos ou hidrostáticos.

2.5.2 - Propriedades gerais de mancais a gás externamente pressurizados

A escolha do líquido ou gás para lubrificação depende da aplicação na qual o mancal será submetido. Por exemplo: carga e rigidez moderadas a altas velocidades funcionam melhor com mancais a gás. Mancais hidrostáticos têm maior rigidez no filme que os mancais aerostáticos, cerca de cinco vezes, devido principalmente à alta pressão do lubrificante. As maiores diferenças no desempenho estão relacionadas aos efeitos de compressibilidade do filme de ar e a viscosidade dos líquidos. Mancais aerostáticos são menores que os hidrostáticos, entretanto a qualidade na produção das superfícies deve ser muito maior e as tolerâncias rigorosamente controladas. A energia que é gasta para

comprimir um gás é maior do que elevar um fluido incompressível à mesma pressão (Slocum, 1992).

O alto custo de produção restringe o emprego dos mancais aerostáticos às máquinas cuja qualidade das peças e desempenhos são prioridade, tais como CMMs (Centros de Manufatura Mecânica), suporte do núcleo de LVDT para melhorar a confiabilidade e reduzir as forças nas medidas, instrumentos de medição por coordenadas, giroscópios para navegação aérea e sistemas de posicionamento de telescópios, entre outros.

Dentre as principais vantagens dos mancais aerostáticos pode-se citar:

- atrito de partida nulo e atrito viscoso muito pequeno;
- geração de calor desprezível, mesmo a altas velocidades;
- ausência de desgaste, pois não há contato entre as partes;
- pequeno erro médio de giro do mancal (excentricidade) devido à espessura do filme de ar da ordem de 5 a 50 μm ;
- relativa independência da operação do mancal em relação à temperatura ambiente, pois a variação da viscosidade do ar é muito pequena com a temperatura;
- livre de vibrações, quando comparado a mancais de rolamento ou outros tipos;
- possibilidade de ser usado onde a contaminação dos materiais deve ser evitada;
- não há necessidade de equipamentos para coleta e retorno para uso posterior;
- é permitido ao ar escapar livremente a partir do mancal e com isso as vedações de borracha, entre os elementos com movimento relativo, podem ser desprezadas. Isto é uma vantagem, quando até mesmo o menor atrito precisa ser evitado.

Como principal desvantagem, está seu comportamento relativamente fraco em presença de forças com componentes dinâmicas, em função do amortecimento inerente ao filme de ar.

2.5.3 – Características dos mancais aerostáticos

Limites de velocidades e acelerações:

Mancais aerostáticos têm apenas atrito viscoso associado ao cisalhamento da camada de filme do mancal durante o movimento. Quando a altas velocidades

(≈ 10 m/s), a folga do mancal deve ser grande o bastante para assegurar que a potência do atrito seja menor que duas vezes a potência de bombeamento (Slocum, 1992). Neste caso o aumento da temperatura devido ao atrito dentro do mancal é compensado por efeitos de refrigeração do filme de ar que se expande quando deixa o orifício.

Faixa de movimentos:

O movimento de mancais lineares pode ser tão grande quanto possível a usinagem das guias, podem ser de dezenas de metros. Movimentos angulares em mancais aerostáticos não são limitados.

Cargas solicitadas:

Como a distribuição de cargas é feita sobre grandes áreas, grandes cargas podem ser suportadas. Um mancal hidrostático (pressão de operação 3,5Mpa) com mesma área pode suportar até cinco vezes a carga de um mancal aerostático. Altas pressões em mancais hidrostáticos (20 MPA) podem suportar cargas ainda maiores, mas pagando com o aumento significativo da geração de calor.

Exatidão:

A exatidão total depende da exatidão dos componentes. A rugosidade superficial máxima de pico a vale dos componentes dos mancais aerostáticos, entretanto, não pode ser maior que um quarto da folga do mancal. Depende de manter os restritores limpos e a pressão livre de pulsações. Mancais aerostáticos lineares são construídos com exatidão submicrométrica.

Repetibilidade:

A repetibilidade depende da estabilidade do sistema de alimentação de ar, incluindo o compressor e os dispositivos que regulam a vazão de ar nos mancais. Evitando ondas de pressão e instabilidade do tipo martelo pneumático e mudanças de temperatura. Os mancais aerostáticos podem alcançar repetibilidade submicrométrica ou até nanométrica.

Resolução:

Desde que não haja estricção, a resolução dos movimentos pode ser considerada ilimitada. Entretanto, o projeto do atuador e dos sistemas de controle não é trivial já que os mancais aerostáticos não têm amortecimento muito bom.

Pré-Carga:

Mancais aerostáticos precisam ser pré-carregados a fim de ganhar rigidez bidirecional. Se um único mancal é usado para suportar uma carga, então com a aceleração ou com a ação da força, no sentido de aumentar a folga ele terá rigidez muito baixa. Conseqüentemente o uso de mancais de sapatas opostas é muito comum em máquinas ferramentas.

Rigidez:

Facilmente da ordem de 100 N/ μ m. A rigidez de mancais aerostáticos não é difícil de ser calculada com exatidão, e não têm problemas de baixo contato que os mancais de deslizamento e de rolamento têm. Deste modo os projetos de mancais aerostáticos são mais determinísticos que os de contato (Slocum, 1992).

Vibração e resistência de contato:

Mancais aerostáticos têm boa resistência à vibração e a choques porque não há contato mecânico entre as partes que se movimentam. Possuem reservatórios de ar (pulmão), caso haja um colapso no sistema de bombeamento evitando a parada total da máquina. Além disso, o mancal deve ser bem projetado para se evitar o efeito “martelo pneumático”, que ocorre quando o filme de ar entra em ressonância, se comprimindo e expandindo.

Atrito:

Não há atrito estático e o atrito dinâmico pode ser desprezado para velocidades menores que 2 m/s. A força do atrito dinâmico é independente da carga aplicada, pois elas não alteram a folga do mancal (Slocum, 1992).

Desempenho térmico:

A viscosidade do ar é muito baixa, portanto os mancais aerostáticos são mais tolerantes as pequenas mudanças do regime devido ao aquecimento viscoso. Por outro lado, os mancais hidrostáticos são menos tolerantes, e grande ênfase deve ser dada ao atrito e a potência de bombeamento para superfícies com altas velocidades, aproximadamente 2 m/s. É importante perceber que o ar se resfria quando se expande, e conseqüentemente para máquinas de precisão isto é importante para minimizar a vazão e o efeito resultante de refrigeração.

A procura por máquinas e mancais de alta rigidez, estática e dinâmica, é conseqüência da demanda por alta precisão e desempenho. As maiores fontes de erros na manufatura de ultraprecisão são as distorções térmicas, como no caso dos mancais hidrostáticos cuja precisão é limitada pelos efeitos térmicos, tornando os mancais aerostáticos os mais indicados para estas aplicações (Slocum, 1992).

Tamanho e configuração:

Mancais aerostáticos ocupam pouco espaço, mas têm significativo sistema de tubulação. Geralmente é desejável que venha apenas uma mangueira de alimentação e o ar distribuído para todas as outras partes do mancal. Arranjos cinemáticos não são necessários, pois os mancais agem com forças constantes que preenchem qualquer orifício existente.

Equipamentos auxiliares:

A maior desvantagem dos mancais aerostáticos é que eles requerem compressor ou um sistema de suprimento de ar. O sistema deve manter o ar extremamente limpo para que não entupa os dispositivos que regulam a vazão, que são orifícios ou ranhuras. Geralmente o ar é filtrado a 1 μm e secado, para minimizar a condensação dentro dos mancais, quando o ar se expande e esfria.

Manutenção:

A limpeza do ar deve ser monitorada e o filtro de ar trocado de acordo com o período estipulado, o sistema de suprimento de ar deve ser inspecionado periodicamente para evitar a falta de ar ou o entupimento dos restritores. Corretamente conservados, os

mancais não devem nem apresentar sinais de desgaste. Existem exemplos de máquinas que não apresentaram qualquer sinal de desgaste, após dez anos de operação contínua.

Compatibilidade de materiais:

Mancais aerostáticos são compatíveis com todos os tipos de materiais. É preciso determinar a magnitude da expansão térmica dos materiais, para que não comprometam o desempenho do mancal. Se a folga for muito grande, faltará ar e diminuirá a rigidez, se a folga for pequena, a rigidez altera pouco.

Custo e vida dos mancais:

O custo dos mancais está associado principalmente a usinagem das passagens de ar e a usinagem das guias com tolerâncias muito estreitas. O custo de manutenção dos sistemas de alimentação de ar deve ser considerado, tal como um filtro secador de ar que fornece ar para vários mancais.

Condições gerais de operação:

O ar entra no mancal a uma pressão P_s , passa pelo dispositivo restritor e cai para P_r , que é a pressão interna do mancal, e sai a P_a (P_{atm}). Mudanças no regime do filme podem alterar P_r , conseqüentemente a capacidade de carga. Um pequeno aumento em P_r dado pelo restritor, aumentando a capacidade de carga, e um acréscimo no regime do filme causa o efeito contrário. O maior objetivo é dimensionar corretamente o restritor em conjunto com o filme, achando a condição ótima de rigidez. Conseqüentemente, projetos que procurem a máxima rigidez podem requerer algum sacrifício da capacidade de carga.

Existem vários tipos de restritores:

Através de orifícios;

Orifícios com rebaixos (bolsão);

Ao longo de entalhes axiais (ranhuras);

Por meio de poros;

O fenômeno “martelo pneumático” pode ocorrer devido à compressibilidade dos gases e conseqüente defasagem entre as mudanças de regime dos mancais e a resposta a

estas mudanças através de variações de pressão nos orifícios para os bolsões de ar. As duas maneiras de contornar este problema são:

- Reduzir a profundidade e o diâmetro do bolsão, diminuindo o volume total;
- Compensar nos orifícios, o que diminuirá a capacidade de carga.

Em geral, mancais de orifícios com bolsões exibem alta rigidez, baixo amortecimento e estabilidade ruim, enquanto os de orifício exibem baixa rigidez, amortecimento relativamente alto e melhor estabilidade. Mancais porosos fornecem alta capacidade de carga e estabilidade ampla (Fourka, 1997).

Filtragem:

Os filtros são selecionados para restringir o tamanho máximo das partículas a um terço da espessura mínima do filme (assumindo que este tamanho de partícula não seja prejudicial ao compressor e a outros componentes do sistema). O filtro é posicionado no lado de alta pressão para prevenir a contaminação do mancal por fragmentos. Quando orifícios ou capilares são utilizados, uma proteção adicional pode ser alcançada através do uso de uma grassa filtragem adjacente ao dispositivo de controle, para ranhuras é necessária uma alta qualidade de filtragem para evitar o bloqueio na alimentação das ranhuras.

A manutenção regular do filtro garante a confiabilidade do sistema, além de estar ajustado com o indicador de queda de pressão.

Breakers:

O circuito elétrico Breaker é introduzido no lado de alta pressão do filtro para proteger contra falta súbita de pressão. Estes circuitos gerenciam o pulmão para garantir pressão até que o mancal pare, também é extremamente necessário um indicador do sistema de suprimento de ar, evitando que o mancal gire sem o filme de ar, o que o danificaria (Slocum, 1992).

Sistema de descarga:

A descarga do sistema de lubrificação durante a produção e depois de montado é importante e muitas vezes insuficientemente executado na prática.

Vapor de óleo:

O vapor de óleo condensa como uma espécie de cera nos furos de alimentação e nas folgas dos mancais. Um método para se evitar tal fenômeno é usar um filtro de carvão na linha de alimentação. Se os furos de alimentação estão bloqueados, uma forma de desobstruí-los é passar álcool industrial por um pequeno período, com o ar de alimentação.

2.5.4 – Equações básicas dos mancais aerostáticos

Segundo Powell, 1970, para um conhecimento básico do comportamento físico dos gases no qual o projeto dos mancais aerostáticos é baseado, pode-se considerar os seguintes casos:

(a) Sapata retangular: em quase todos os mancais o escoamento nas folgas dos mancais é laminar e a queda de pressão ocorre devido ao cisalhamento do filme de gás. Por isso é de fundamental interesse entender o escoamento laminar de gases entre placas paralelas.

Neste tratamento simplificado são feitas as seguintes suposições:

- A inércia da força devido à aceleração pode ser negligenciada comparada com a força de atrito devido ao cisalhamento viscoso;
- As condições de escoamento laminares existem para todos os pontos do filme de gás;
- A pressão é constante em qualquer seção normal a direção do escoamento;
- Não há deslizamento nas fronteiras entre o fluido e as placas.

Nas análises seguintes, as dimensões e coordenadas são mostradas na figura 6.

Figura 6 – O fluxo ocorre na direção x por a pressão P_1 ser maior que P_2 . A distribuição de velocidade na seção transversal do filme segue uma curva parabólica e o gás em contato com cada placa é estacionário (Powell, 1970).

Usando estas nomenclaturas e usando as condições de estado para as bem conhecidas equações de Navier Stokes, que incluem as forças de viscosidade a descrição matemática básica de dinâmica de fluidos desenvolvida por Euler em 1941, tem-se a seguinte expressão:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1)$$

Esta equação conecta o gradiente de pressão na direção x com a distribuição de velocidade resultante na direção y. Onde u é a velocidade do gás em qualquer ponto, P é a pressão no ponto e μ é a viscosidade do gás.

Integrando a equação (1):

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dx} y + A$$

onde A é uma constante;

integrando novamente

$$u = \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dx} \frac{y^2}{2} + Ay + B$$

Se h é a folga entre as placas, então $u=0$ em $y=0$ e em $y=h$; substituindo estas condições de contorno obtém-se

$$B = 0$$

e

$$A = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} h$$

E também

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} y(y-h) \quad (2)$$

A equação (2) dá a velocidade do gás em qualquer ponto da seção do filme e pode-se notar que a distribuição de velocidade é parabólica. A mais alta velocidade está no centro da folga, $y=h/2$.

A vazão entre as placas é dada por:

$$m = \bar{\rho} \int_0^h u dy$$

onde m é a vazão e ρ é a densidade do gás, na qual substituindo u da equação (2) vem

$$m = \bar{\rho} \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dx} \int_0^h (y^2 - yh) dy$$

e

$$m = -\frac{\bar{\rho} h^3}{12\mu} \frac{dP}{dx}$$

arranjando a equação

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{12\mu m}{a \rho h^3} \quad (3)$$

A equação (3) dá a relação entre a vazão e o gradiente de pressão entre as placas na direção do escoamento. A densidade ρ tem sido assumida constante na direção y e a equação (3) pode ser aplicada para líquidos e gases. Entretanto, a densidade de um gás é dependente da pressão e como a pressão varia na direção x , a equação (3) não pode ser integrada para dar a distribuição de pressão na direção x até que alguma relação entre a densidade e a pressão seja estabelecida.

Pode-se assumir que o comportamento do gás é isotérmico desde que o calor gerado no filme de gás seja pequeno, e as paredes dos mancais sejam de metal e consequentemente de alta condutividade térmica.

Em condições isotérmicas:

$$\frac{P}{\rho} = RT \quad (4)$$

onde R é a constante do gás e T é a temperatura absoluta.

Substituindo ρ na equação (3) e separando as variáveis:

$$P dP = -\frac{12\mu m RT}{a h^3} dx$$

Então

$$P_1^2 - P_2^2 = \frac{24\mu m RT l}{a h^3} \quad (5)$$

A equação (5) é de fundamental importância para o entendimento dos mancais aerostáticos. Ela expressa a queda de pressão ao longo da sapata em termos da vazão, propriedades dos gases e dimensões.

(b) Placas circulares: o escoamento laminar em sapata retangular foi considerado e mostrado como na teoria pode ser aplicado para os mancais radiais. Outro caso importante ocorre para mancais axiais onde o gás é alimentado no centro de duas placas circulares. O esquema da figura 7 mostra este caso assumindo o escoamento laminar:

Com as mesmas suposições admitidas anteriormente, a equação de Navier Stokes pode ser escrita como:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (6)$$

onde r é o raio em algum ponto do centro da placa, no qual é maior que o raio do bolsão, a , e menor que o raio do mancal, b .

Figura 7 – Simples mancal axial aerostático, com furo central de alimentação e bolsão (Powell, 1970).

Integrando duas vezes a equação (6) e aplicando as condições de contorno assumidas anteriormente:

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dr} y(y-h) \quad (7)$$

A vazão através da coroa circular de largura h e raio r é dada por:

$$m = 2\pi r \rho \int_0^h u dy$$

Substituindo u da equação (7) e integrando, tem-se

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{12\mu m}{\pi r \rho h^3} \quad (8)$$

Na equação (8), como na equação (3), o sinal negativo implica que a pressão cai na direção do escoamento, ou seja, na direção positiva de r ou na direção positiva de x .

Novamente assumindo condições isotérmicas no filme de gás e separando as variáveis

$$P dP = -\frac{6\mu m RT}{\pi h^3} \cdot \frac{dr}{r} \quad (9)$$

e integrando do bolsão, onde $r=a$ e $P=P_a$, a outra extremidade, onde $r=b$ e $P=P_b$, obtêm-se:

$$P_b^2 - P_a^2 = \frac{12\mu m RT}{\pi h^3} \log_e \left(\frac{b}{a} \right) \quad (10)$$

A equação (10) pode ser arranjada para fornecer a vazão e pode ser visto que a vazão é proporcional ao cubo da folga nos mancais axiais, bem como nos mancais radiais.

2.6 - Mancais Porosos

2.6.1 – Introdução

Houve aumento significativo da demanda por maior precisão e desempenho na produção das estruturas das máquinas forçando uma clara necessidade por mancais de maior rigidez estática e dinâmica que as alcançadas atualmente (Corbett & STEPHENSON, 1996).

A partir de 1976, grande número de trabalhos tem sido publicado, principalmente nos últimos anos, mormente no Japão e na Alemanha. Pode-se observar uma subdivisão desses trabalhos, o primeiro grupo, liderado pela Índia, com análises tridimensionais e numéricas em mancais axiais retangulares, Esses trabalhos incluem condições como a permeabilidade anisotrópica, inclinações etc. O segundo grupo, baseado na Alemanha e no Japão, tentam tratar dos problemas de estabilidade pneumática com o desenvolvimento de um material poroso chamado de “superfície carregada”, que em essência é constituído de um grosso substrato e uma fina e densa cobertura, assim, aparentemente, resolvendo os problemas de estabilidade associados aos vazios entre os poros na superfície do mancal. Isto provoca um renovado interesse por mancais aerostáticos porosos, que não parece ter sido muito bem difundido a aplicações práticas, apesar de seu grande potencial (Kwan, 1998).

Sobre os mancais convencionais, os mancais porosos são mais simples de serem projetados e fabricados, tem maior capacidade de carga e rigidez e possuem características de amortecimento superiores (Slocum, 1992). Mesmo geometrias complicadas, tais como mancais esféricos podem ser alcançados sem dificuldades (Kanai, 1990).

Para o aproveitamento dessas vantagens, devem ser superadas as dificuldades de se produzir mancais idênticos com materiais que tenham os mesmos valores de permeabilidade e porosidade (repetibilidade e uniformidade de comportamento).

Apesar de publicações a respeito de complexas folgas geométricas e altíssima rigidez, algumas das vantagens inerentes ao mancal poroso ainda permanecem sem aplicação, como a alta taxa de amortecimento e simplicidade de construção. Assim, o potencial dos mancais porosos permanece alto e provavelmente no futuro as pesquisas se voltem ao desenvolvimento de materiais específicos ao tipo de aplicação, ao invés de se concentrarem na teoria dinâmica dos mancais. Na Universidade de Cranfield,

Inglaterra, as pesquisa de desenvolvimento de materiais estão adiantadas, em particular o desenvolvimento de materiais de cerâmicas porosas (Kwan, 1996).

2.6.2 – Permeabilidade:

A facilidade que o ar encontra em atravessar o material poroso usado como restritor em mancais aerostáticos é quantificada pelo coeficiente de permeabilidade. O procedimento para determinação dos coeficientes de: permeabilidade viscosa, Φ_v , expresso em m^2 e permeabilidade inercial, Φ_i , expresso em m, será explicado posteriormente.

A permeabilidade é diretamente proporcional a porosidade e ao tamanho médio das partículas. O controle simultâneo desses parâmetros é extremamente difícil, surgindo assim o primeiro problema originário da produção e processamento dos materiais porosos. Trabalhos realizados por Rasnick (1974) e Kanai (1990) relatam ações corretivas para ajustes no processamento através da deposição de sucessivas camadas de agentes bloqueadores na superfície dos materiais, até que os valores desejados de permeabilidade sejam alcançados. Porém a adição dessas camadas aumenta o custo e destrói a simplicidade de produção dos materiais porosos usados como restritores, além disso, surgem manchas durante a usinagem quando materiais dúcteis são empregados. Isto resulta na completa ou parcial obstrução dos poros na superfície, com drástica influência no comportamento da restrição do escoamento pelo meio poroso (Polone & GOREZ, 1980).

O segundo problema ocorre quando os materiais empregados nos mancais têm um tamanho de partículas grosseiro (aproximadamente a folga nominal de trabalho do mancal). Isto é especialmente verdade para materiais frágeis, tais como as cerâmicas, as quais não podem ser ductilmente usinadas por meios convencionais. O volume morto extra do ar entre o pico da superfície porosa e a estreita passagem do poro, aproximadamente metade do tamanho da partícula abaixo da superfície, é suficiente para causar instabilidade pneumática (Kilmister, 1969).

2.6.3 – Medição da Porosidade:

Existem dois tipos de porosidade: as partículas que formam o sólido, chamadas de porosidade aberta e os vazios existentes entre as partículas, chamados de porosidade fechada.

Para medir-se a porosidade do elemento cerâmico usado como restritor do mancal aerostático do presente trabalho, primeiramente adotou-se a norma técnica para determinação do teor de sílica pelo método da fluorização, ISO 2738:1987, para metais porosos, com água deionizada no lugar de óleo para impregnação das amostras. Devido à boa afinidade da alumina com a água o encharcamento total da cerâmica era esperado.

Depois de totalmente limpas e secas, cada amostra foi pesada em uma balança eletrônica Satorius modelo 1712, com resolução de 1µg (Kwan, 1996). As amostras foram completamente encharcadas em uma câmara de vácuo com água, permanecendo lá até que não se possa ver bolhas de ar saindo dos corpos. As porosidades, aberta e fechada, puderam ser determinadas pelo princípio de Arquimedes, porém os resultados não foram como os esperados, levando à conclusão de que a impregnação da água não foi completa.

Uma variação comum na norma para auxiliar na impregnação das amostras é o emprego de xileno ou tolueno, porém os resultados ainda foram maiores que os esperados. Na solução encontrada por Kwan (1996) a amostra é colocada na câmara de vácuo sobre um recipiente com água deionizada e então mergulhada para a impregnação da água, mas antes da amostra ser retirada, a câmara é repressurizada à pressão atmosférica. Evidências mostram a efetividade do novo método.

2.6.4 – Medição da permeabilidade:

Cada propriedade do material foi medida através de métodos específicos, tais como microscopia eletrônica de varredura (Scanner ABT55) para a microestrutura ou medidas com micrômetro digital para dimensões externas. Dessa forma os coeficientes de permeabilidade foram medidos segundo o método da ISO 4022 recomendado para amostras circulares.

Este método consiste basicamente em injetar um fluido de propriedades físicas conhecidas (geralmente gasoso) através da seção transversal da amostra, medir as pressões de entrada/saída e as vazões. Para tanto foi empregado um equipamento conforme a figura 8.

Figura 8 – Diagrama do dispositivo para medida de permeabilidade. (Kwan, 1996)

O método é baseado no modelo de Forchheimer, onde a variação da pressão de entrada, a diferença de pressão e a taxa de vazão podem ser obtidas. Plotando tais informações obteve-se o coeficiente de permeabilidade.

A partir do gráfico:

Figura 9 – Gráfico ilustrativo para determinação dos coeficientes de permeabilidade.

onde Δ_p é a variação da pressão, A_p é a área da amostra, Z_p é a espessura da amostra, Q_m é a vazão média, ρ_m é a densidade do ar à pressão atmosférica e η é a viscosidade do ar. A inclinação da reta dos mínimos quadrados corresponde ao coeficiente de permeabilidade inercial e a intersecção da reta com o eixo dos Y corresponde ao coeficiente de permeabilidade viscosa.

2.6.5 – Características estáticas

A maioria dos trabalhos sobre mancais axiais é relacionada com a forma circular, devido à geometria simples. Uma das primeiras publicações foi feita por Sheinberg e Shuster (1960), na qual incluíram análises teóricas da distribuição de pressão, fluido incompressível e a lei de Darcy, que é a relação matemática que governa o escoamento da água através de meios granulares ou o escoamento de outros líquidos através de materiais permeáveis. Introduzindo o conceito X, parâmetro do mancal, que posteriormente foi renomeado de Λ , número do mancal, por Gargiulo & Guilmour (1968).

Diferente método foi usado por Mori (1965) na tentativa de tratar os poros médios como equivalentes a um filme fluido na análise bidimensional do escoamento, assim introduzindo o método da folga equivalente. Mori em uma análise tridimensional posterior, mostrou grande concordância com a análise simplificada.

Mais tarde, Gargiulo e Guilmour (1968), através do método de elementos finitos, compararam os resultados teóricos com os resultados experimentais quanto à vazão. Isso apontou para a necessidade de compensar a rugosidade superficial, além da análise do efeito anisotrópico da permeabilidade nas direções axiais e radiais que tem pouca interferência na capacidade de carga, mas reduz o consumo de ar em 10%.

Investigações sobre os efeitos da inércia do fluido mostram que esta tem pouco efeito sobre a capacidade de carga e a rigidez dos mancais, pois está restrita a uma faixa estreita do perímetro do mancal (Hsing, 1971).

2.6.6 – Características Dinâmicas:

Uma das importantes vantagens dos mancais aerostáticos porosos em comparação aos outros tipos de restritores está na melhor estabilidade e características de amortecimento (Sheinberg, 1960).

Boefy (1981) e Stowell (1971) investigaram experimentalmente os efeitos do tamanho dos orifícios na rigidez e na estabilidade dos mancais aerostáticos axiais e mostraram, respectivamente, que pequenos orifícios fornecem alta rigidez, enquanto alta estabilidade é alcançada com tamanho corretamente selecionado dos orifícios, o amortecimento dos mancais porosos pode ser até cinco vezes maior que o dos mancais de orifícios, sendo o coeficiente de permeabilidade um parâmetro crítico, do qual dependem todas as características. Alta rigidez e adequado campo de funcionamento para mancais porosos são alcançados com coeficientes de permeabilidade menores que 10^{-12} m^2 . Para tanto a Universidade de Munique, por exemplo, tem pesquisado um novo processo para alcançar a baixa permeabilidade, já que os padrões encontrados mostram materiais porosos, facilmente usinados, com valores desta ordem.

Mancais porosos fornecem alta capacidade de carga e amplo intervalo de estabilidade. Fourka e Bonis (1997) compararam, através do método de elementos finitos, os mancais aerostáticos de restritores de orifícios e o mancais porosos. Dois mancais de orifícios: um com doze orifícios e outro com um orifício tipo bolsão, e outros dois mancais com restritores porosos: um de parede porosa e outro com doze restritores porosos. Os resultados são mostrados nas figuras 10, 11 e 12.

Figura 10 - Capacidade de carga adimensional x Espessura de filme adimensional (Fourka & Bonis, 1997).

Figura 11 - Rigidez adimensional x Espessura de filme adimensional (Fourka & Bonis, 1997).

Figura 12 - Rigidez adimensional x Vazão adimensional (Fourka & Bonis, 1997).

Observa-se nas figuras 10, 11 e 12 que:

Os mancais de parede porosa apresentam superior capacidade de carga, mas em contrapartida consome maior quantidade de ar;

O mancal tipo bolsão apresenta máxima capacidade de carga, maior que o de doze orifícios, mas só a alcançou com uma pequena espessura de filme e sua capacidade de carga diminui rapidamente com o aumento da altura da folga, caindo abaixo da capacidade do mancal com 12 orifícios;

A rigidez do mancal tipo bolsão é duas vezes maior que o mancal de parede porosa, com a vantagem de consumir cinco vezes menos ar, em compensação o mancal de parede porosa se ajusta facilmente às condições de trabalho e melhor estabilidade estática;

O mancal com 12 restritores porosos (10^{-13} m^2) e o mancal de parede porosa (10^{-14} m^2) apresentam rigidez similar, com a vantagem dos restritores porosos consumirem 100 vezes menos ar;

Considerando as várias soluções investigadas, a máxima rigidez encontrada foi no mancal com 12 restritores porosos (10^{-14} m^2), mas com uma folga menor que $5\mu\text{m}$, com um intervalo muito pequeno de variação. Para esse desempenho e uma folga de ar maior, seria necessário aumentar a espessura do material poroso e manter a permeabilidade em 10^{-14} m^2 .

A escolha do tipo de sistema de alimentação depende do tipo de aplicação para o qual o mancal é projetado. Deve-se ajustar carga, rigidez, estabilidade e vazão. Por exemplo, para cargas e rigidez moderadas são favoráveis aos restritores porosos com 10^{-13} m^2 de permeabilidade, enquanto para alta rigidez e cargas moderadas são melhores os mancais tipo bolsão (Fourka & Bonis, 1997).

2.6.7 – Técnicas de produção de cerâmicas porosas:

As cerâmicas estão sendo mais procuradas para aplicações em máquinas de ultraprecisão e seus componentes devido as suas superiores propriedades mecânicas, estabilidade dimensional, baixo coeficiente de expansão térmica comparada com maioria dos materiais, baixa condutividade térmica, alto calor específico, baixa distorção térmica devido a variações de temperatura. Geralmente são muito resistentes à corrosão e ao atrito. Estas propriedades fazem da cerâmica a escolha ideal do material para ambientes severos.

A maioria dos exemplos de mancais aerostáticos porosos são de grafite ou de materiais metálicos, devido ao baixo custo e facilidade de usinagem. O uso de cerâmicas porosas em tais aplicações, por outro lado, eliminaria os problemas de manchas, as quais são as principais causas do controle ruim da permeabilidade associada aos outros materiais dúcteis (Kwan, 1996).

A sinterização, fusão de partículas sólidas a altas temperaturas abaixo do ponto de fusão do material, é um dos métodos mais comuns de produção de materiais porosos. A perda de pó tende a reduzir a energia de superfície e a área total da superfície no processo. Pequenas partículas têm maior energia de superfície por volume, o que explica sua maior taxa de sinterização à mesma temperatura. Comparada com a sinterização convencional, para alcançar a completa densificação, a sinterização de

materiais porosos é usualmente feita a baixas temperaturas e pequena duração. Agentes formadores de poros, tal como negro de fumo, podem ser usados e subseqüentemente queimados ou lixiviados para revelar os poros (Trimm & STANISLAUS, 1986).

O método convencional de pressão isostática a quente (HIPing – Hot Isostatic Pressing) envolve a perda de pó em um metal, ou nos casos de altas temperaturas de sinterização, um recipiente de vidro projetado para combinar o tamanho final e o perfil do componente. O recipiente é evacuado e selado, antes de ser colocado no forno. O forno é essencialmente montado dentro de um vaso de alta pressão, o qual é pressurizado por um fluido gasoso (usualmente um gás inerte) durante a sinterização. Ambos os perfis de temperatura e pressão podem ser controladas separadamente. Pela aplicação de pressão externa no recipiente de vidro, o qual é projetado para amolecer e não para fundir à temperatura de sinterização, uma força extra de compactação começa a ser exercida isostaticamente durante a entrada na fase de sinterização, resultando em alta densificação e contração mais uniforme em todas as direções (Sheppard, 1992).

Grande parte dos métodos de sinterização não oferece controle suficiente do tamanho e da distribuição dos poros no produto final, resultando em porosidade relativamente alta, tenacidade fraca e baixo módulo de elasticidade. Ishizaki (1995) desenvolveu um novo método, conhecido como cápsula livre na pressão isostática a quente, capaz de produzir uma gama de materiais porosos com melhores porosidades, tensões mecânicas e consistência.

No método da cápsula livre não se utiliza o recipiente de vidro ou de preferência utiliza-se um recipiente poroso que permita o manuseio e a retenção do formato durante a sinterização. Isto permite a pressão do gás penetrar nos poros durante o processo. A alta pressão do gás dentro dos poros serve para dois propósitos, acentuar a difusão superficial e prevenir o completo fechamento dos poros. Isto ajuda na redução da porosidade fechada e melhora a consistência da porosidade aberta. Este método tem se mostrado viável para a produção de materiais cerâmicos porosos para aplicações em mancais aerostáticos.

Kwan (1996) estudou a relação entre a diversas variáveis do processo, tais como porosidade, condições de processo e propriedades estruturais na permeabilidade final. Isto permitiu a previsão das condições de processo para alcançar níveis pré-determinados de permeabilidade, bem como das propriedades elásticas. A medida precisa e a uniformidade da temperatura dentro do forno foi identificada como o fator

que maior influência na consistência e na permeabilidade pré-determinada do material do substrato. A cerâmica usada neste trabalho foi sinterizada usando o método de pressão isostática a quente, a partir de partículas de alumina de 7 μm a 1750 °C, 1000 bar de pressão por uma hora.

A figura 13 mostra a microestrutura e a figura 14 mostra a macroscopia da cerâmica.

Figura 13 – Microscopia da cerâmica de alumina utilizada como restritor poroso.

Figura 14 – Macroscopia da cerâmica de alumina utilizada como restritor poroso.

Este trabalho, utilizando o material cerâmico produzido por Kwan, compara a performance de dois mancais aerostático axial, quanto à capacidade de carga e rigidez, usando restritor: de orifício (sem bolsão ou rebaixo) e poroso.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1- Planejamento de experimentos

A partir de um disco cerâmico fabricou-se um restritor poroso intercambiável com o mancal de orifício a fim de comparar o desempenho deste dois tipos de restritores de mancais aerostáticos.

Os materiais frágeis como as cerâmicas, possuem características teoricamente adversas ao uso do processo de usinagem. Entretanto, se respeitadas algumas premissas básicas, como profundidade e espessura de corte, podem ser usinadas no regime dúctil, de modo a se obter uma superfície livre de defeitos e com acabamento espelhado. Porém, as dimensões envolvidas no processo fazem com que mínimos erros ou variações na usinagem produzam danos, de modo que a remoção seja acompanhada de fratura. Levando-se em consideração estas características, usinou-se um disco de cerâmica porosa que funcionará como mancal axial aerostático, figura 15.

Figura 15 – Ilustração do restritor cerâmico do mancal aerostático.

Neste trabalho, procurou-se comparar os mancais axiais de restritores porosos com os de restritores de orifícios, a fim de fornecer mais uma base científica que auxilie na escolha de um mancal para aplicações específicas.

3.2 – Características e preparação do restritor cerâmico

O restritor é composto de cerâmica de alumina porosa, produzido pela Universidade de Cranfield (Inglaterra) onde foi estudada e definidas suas propriedades mecânicas, tais como a permeabilidade viscosa de $4,23\text{E}^{-15}\text{m}^2$ e a permeabilidade inercial de $2,05\text{E}^{-9}\text{m}$. Foi feito um rebaixo na cerâmica para que esta servisse como restritor, a usinagem foi realizada no Laboratório de Engenharia de Precisão (EESC – USP), em uma máquina-ferramenta Geradora de Superfícies Anesféricas ASG 2500 (“Aspheric Surface Generator 2500”), da RANK PNEUMO (atualmente TAYLOR HOBSON PNEUMO). Trata-se de uma máquina-ferramenta especialmente projetada tanto para o torneamento como para a retificação de ultraprecisão. Esta máquina possui uma base de ferro fundido, termicamente livre de tensões, a qual é isolada de vibrações externas através de isoladores pneumáticos passivos montados cinematicamente numa estrutura de aço soldada. Os mancais do eixo-árvore são aerostáticos, de modo a conferir precisão de giro, rigidez axial e radial compatíveis com o nível de precisão a que o equipamento se propõe (10nm de precisão de posicionamento).

Um Controle Numérico Computadorizado (CNC) ALLEN BRADLEY 8200 é utilizado para controlar simultaneamente os deslocamentos dos eixos X e Z da máquina. Neste ponto, vale a pena ressaltar que não existe superposição dos eixos, com o objetivo de se evitar a propagação dos erros de posicionamento. As posições dos eixos são monitoradas por transdutores interferométricos a laser, da HEWLETT-PACKARD, com retroalimentação ao controlador. Os deslocamentos dos eixos são suportados por guias hidrostáticas. Também a fixação das peças a serem usinadas é especial, presas à placa através de vácuo (cerca de 70kPa), como pode ser visto na figura 16.

Figura 16 – Amostra de uma peça fixada. A fixação no eixo-árvore se dá através de vácuo.

Para finalizar, a máquina-ferramenta está instalada em uma sala semilimpa, com controle de temperatura ($20,0^{\circ}\text{C} \pm 0,1$) e umidade.

3.3 – A Ferramenta de diamante: características geométricas

A ferramenta de diamante monocristalino é uma das peças fundamentais na usinagem de ultraprecisão. Junto com mancais aerostáticos, controle ultraprecisão de posicionamento e elevada rigidez, preenchem os requisitos necessários a este tipo de usinagem, onde acabamentos superficiais de ordem nanométrica são freqüentes.

A ferramenta empregada foi uma CO30MG da CONTOUR FINE TOOLING (EUA) e suas principais características geométricas estão listadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características geométricas da ferramenta de diamante CO30MG.

Ferramenta CO30MG	
Ângulo de saída γ (graus)	-2,5
Ângulo de folga α (graus)	12
Raio de ponta r_p (mm)	0,776

3.4 – Mancal axial aerostático

Uma base de latão intercambiável foi usinada para que a cerâmica e o orifício pudessem ser testados e comparados sob uma mesma massa e volume, figura 17. O mancal foi alimentado por um compressor de fluxo constante, Chicago Pneumatic rotativo de parafuso e controle eletro pneumático, e a vazão limitada por um manômetro Norgren (figura 18), desta forma os dois mancais, de orifício e poroso, tem o mesmo peso, 2,3 kg.

Figura 17 – Ilustração do mancal com restritor de cerâmica porosa.

Figura 18 – Manômetro regulador de vazão.

O sistema de medição, utilizado para medir a espessura do filme de ar, é composto por um sensor de deslocamento, um instrumento eletrônico para medição linear com indicação analógica (LVDT Tesatronic TT-20) da TESA, sendo que este

instrumento trabalha com frequência portadora de 13KHz, apresentando segundo o fabricante, erro máximo na indicação de (mais ou menos) $0,01\ \mu\text{m}$ e tempo de estabilização na saída analógica de 20ms, figura 19.

Figura 19 – O mancal aerostático e o sistema de aquisição de sinal.

Os ensaios consistiam em carregar os dois mancais, restritor poroso e restritor de orifício, sobre uma superfície espelhada, a pressões pré-determinadas e cargas conhecidas medindo-se a espessura do filme de ar.

Com os resultados obtidos, procurou-se comparar os tipos de mancais quanto à capacidade de carga e a rigidez, gerando assim subsídios que auxiliem a escolha de mancais aerostáticos.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

Empregou-se a mesma base para os dois mancais, isto é, uma base intercambiável onde podem ser montados os dois tipos de restritores, portanto com dimensões e pesos idênticos, aumentando-se desta forma a precisão na comparação dos mancais.

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos nos ensaios do mancal com restritor de orifício:

Tabela 4 – Resultados dos ensaios do mancal com restritor de orifício.

P.A = 1,0 bar		P.A = 2,0 bar		P.A = 2,5 bar		P.A = 3 bar	
Carga (Kg)	Folga (μm)	Carga (Kg)	Folga (μm)	Carga (Kg)	Folga (μm)	Carga (Kg)	Folga (μm)
2,3	29	2,3	40	2,3	54	2,3	59
2,8		2,8	36	3,3	43	2,8	52
		3,3	32	3,8	38	3,3	48
		3,8	29	4,3	37	3,8	46
		4,3	26	4,8	37	4,3	43
		4,8		5,3	33	4,8	42
				5,8		5,3	41
						5,8	39
						6,3	37

A Tabela 5 mostra os resultados obtidos nos ensaios do mancal com restritor poroso:

Tabela 5 – Resultados dos ensaios do mancal com restritor poroso.

P.A = 1,0 bar		P.A = 2,0 bar		P.A = 2,5 bar	
Carga (Kg)	Folga (μm)	Carga (Kg)	Folga (μm)	Carga (Kg)	Folga (μm)
2,3	45	2,3	65	2,3	72,5
3,3	37,5	3,3	60	3,3	60
4,3	31	4,3	52,5	4,3	53,5
5,3	27,5	5,3	47	5,3	47,5
6,3	24	6,3	44	6,3	43,75
7,3	22,5	7,3	40	7,3	40
9,3	16	8,3	35	8,3	39
11,3	12,5	10,3	30	9,3	35
13,3	7,5	12,3	25	10,3	32,5
15,3	6,5	14,3	20	11,3	30,5
17,3	4	16,3	16	12,3	29
		18,3	13	13,3	26
		19,3	11,5	14,3	25
		20,3	11	15,3	22,25
		21,3	9	16,3	21
		22,3	8,5	17,3	18,25
				18,3	17
				19,3	15,5
				20,3	12,5
				21,3	10
				22,3	9

Para cada pressão de entrada gerou-se, usando o software Origin e aproximando as curvas por polinômios de terceira ordem, foram geradas as curvas mostradas na figura 20 que correlaciona a carga com a espessura do filme de ar (folga) no mancal. Desta forma obtém-se as respectivas capacidades de carga.

Observa-se que para o mancal com restritor de orifício a pressão de 1 bar foi insuficiente para que o mancal pudesse ser carregado, sendo sua capacidade considerada nula para essa pressão. Já o elemento poroso usado como restritor não suportou a pressão de 3 bar e rompeu-se.

Figura 20 – Gráfico do carregamento suportado em função da espessura do filme.

O carregamento máximo para os ensaios foi determinado pela condição de folga nula ou próxima de zero. O critério de determinar-se à capacidade de carga através de uma variação máxima permissível na folga não foi adotado. Também não foi observado que a capacidade de carga nominal poderia ser determinada para a condição de máxima rigidez. Essas condições não têm importância para os ensaios, visto que a comparação pode ser feita de maneira mais eficaz com mais pontos. A análise dos gráficos pode remeter a conclusões a respeito da carga nominal e máxima rigidez para cada condição de pressão e consumo de ar. O critério para a escolha do material poroso e suas dimensões e dimensões do orifício foi o consumo semelhante de ar para condições semelhantes de pressão bem como características semelhantes de volume ocupado.

O mancal com restritor de elemento poroso, à pressão de entrada de 1 bar, apresentou folga, obtida sem carregamento, ou seja, somente com o peso próprio do mancal, de 45 μm e o carregamento máximo alcançado foi de 17,3 kg, com uma folga de 4 μm .

Elevando-se a pressão de entrada para 2 bar a folga obtida sem carregamento foi 65 μm e o carregamento máximo alcançado foi de 22,3 kg, com uma folga de 8,5 μm .

À máxima pressão de entrada, 2,5 bar, o mancal com restritor poroso não sofreu alterações no carregamento máximo e na folga correspondente comparados com a pressão de 2 bar.

Como a pressão de entrada de 1 bar foi insuficiente para que o mancal com restritor de orifício pudesse ser carregado, sua capacidade de carga limitou-se ao peso próprio, com uma folga de 29 μm .

Aumentando-se a pressão de entrada para 2 bar, a folga, sem carregamento, foi de 40 μm . A carga máxima suportada foi de 4,3 kg, com uma folga de 26 μm .

Aplicando-se a máxima pressão suportada pelo restritor poroso ao mancal com restritor de orifício, a folga foi de 54 μm sem carregamento e de 33 μm para o carregamento máximo de 5,3 kg.

Para finalizar os testes, aplicou-se a pressão de 3 bar, a qual o restritor poroso não suportou, ao mancal com restritor de orifício, porém a capacidade de carga continuou baixa. A folga sem carregamento foi de 59 μm e com o carregamento máximo, 6,3 kg, de 37 μm .

Dessa forma através da derivada primeira das curvas de capacidade de carga foram obtidas as curvas de rigidez para cada um dos mancais.

A figura 21 mostra o gráfico das derivadas das curvas de capacidade de carga em função da espessura do filme em escala logarítmica.

Figura 21 – Gráfico das derivadas primeiras das curvas de capacidade de carga, equivalente à rigidez dos mancais.

A região de máxima rigidez está entre 7,5 μm e 12,5 μm de folga para o mancal com restritor poroso a pressão de entrada de 1 bar, alcançando valores de até 105 kg/ μm .

Elevando-se a pressão de entrada para 2 bar, o intervalo de máxima rigidez passa a ser de 12,5 μm a 17,5 μm , com até 78 kg/ μm de rigidez. Entretanto, para a pressão de 2,5 bar não foi possível observar a região de rigidez máxima, apenas os resultados apenas indicam que a rigidez é inversamente proporcional a folga.

Para o mancal com restritor de orifício, a região de máxima rigidez a pressão de entrada de 2 bar está entre 29 μm e 31 μm , sendo a o valor máximo de 17,5 kg/ μm .

Elevando-se a pressão de entrada para 2,5 bar o intervalo de máxima rigidez fica entre 38,5 μm e 40,5 μm , com até 55 kg/ μm de rigidez.

Finalizando os ensaios a pressão de entrada de 3 bar o intervalo de máxima rigidez está entre 4 μm e 5 μm , para 40 kg/ μm de rigidez.

CAPÍTULO 5

5. Conclusões

Como esperado o mancal com restritor poroso apresenta melhores capacidades de carga e rigidez que o mancal de orifício para as mesmas condições de tamanho (dimensões do mancal) e consumo (não registrado no trabalho experimental, mas considerado para o projeto dos dois mancais). A carga máxima suportada pelo mancal poroso foi de 22,3 kgf, enquanto o mancal de orifício, mesmo à pressão de 3 bar, suportou apenas 5,3 kgf.

A capacidade de carga do mancal poroso, à pressão de 2,5 bar, não aumenta em relação à pressão de 2 bar, fixando-se a espessura do filme em 15 μm , a rigidez à 2 bar de pressão é máxima, alcançando aproximadamente 75 kgf/ μm , e à 2,5 bar de pressão de entrada a rigidez é de aproximadamente 60 kgf/ μm e tende a aumentar com a diminuição da folga, porém não foi possível identificar o intervalo de máxima rigidez neste ensaio.

Pode-se notar, além da capacidade de carga, a superioridade do mancal com restritor de elemento poroso em relação à rigidez. Observando o gráfico da figura 21 a maior rigidez alcançada pelo mancal de orifício foi de 55 kgf/ μm ao passo que para o mancal com restritor de elemento cerâmico poroso, regiões específicas de máxima rigidez atingiram 105 kgf/ μm . Além disso, o mancal com restritor de orifício apresenta intervalos de trabalho de espessura de filme muito restritos, independentemente das pressões de entrada.

As curvas de rigidez em forma de sino indicam a praticidade do trabalho realizado, bem como fornece diretrizes na escolha dos parâmetros de operação dos mancais. Na escolha da pressão de trabalho, além da capacidade de carga, deve-se levar em consideração a espessura de filme necessária para que o mancal trabalhe na região de máxima rigidez.

Tais fatos aliados à facilidade de construção fazem dos mancais aerostáticos com restritores porosos uma ótima opção para máquinas de ultraprecisão.

6. Sugestões para trabalhos futuros

Apesar das inúmeras vantagens, a disponibilidade de materiais porosos com característica que satisfaçam as condições de fluxo, continua sendo a grande barreira para a ampla aplicação dos mancais aerostáticos porosos. Grande parte dos trabalhos é voltada para teoria dinâmica dos mancais, entretanto a Universidade Cranfield, Inglaterra, tem buscado novas técnicas para produção e estudo dos materiais porosos.

O potencial dos restritores porosos permanece alto, diante do desenvolvimento de materiais porosos padronizados para este propósito. Algumas vantagens chaves dos mancais porosos continuam não desafiadas, tais como alto amortecimento e simplicidade de construção, indicando que os futuros esforços poderão ser concentrados para melhor compressão e certificação dos resultados.

Outra possibilidade está na comparação entre os mancais com restritor de cerâmica porosa e com vários restritores (resistências) de cerâmica porosa, quanto à capacidade de carga, rigidez e consumo de ar.

BIBLIOGRAFIA

- BALESTRERO, L. A. P. (1997). Estudo de mancais fluidicos ranhurados pressurizados externamente. São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BOEFY, D. A. et al. (1981). An experimental investigation of the effect of orifice restrictor size on the stiffness of an industrial air lubricated thrust bearing. *Tribology International*, v. 14, p. 287 - 291.
- CHENG, K. & ROWE, W. B. (1995). A selection strategy for the design of externally pressurized journal bearings. *Tribology International*, v. 28, n. 7, p. 465 - 474.
- COBERT, J. & STEPHENSON, D. J. (1996). The development of 2-layered porous ceramic aerostatic guideway bearings for ultra precision applications. EPSRC Grant Reference GR/K89801, oct.
- FOURKA, M. & BONIS, M. (1997). Comparison between externally pressurized gas thrust bearings with different orifice and porous feeding system. *Wear*, v. 210, p. 311 - 317.
- GARGIULO, E. P. Jr. & GILMOUR, P. W. (1968). A numerical solution for design of externally pressurized porous gas bearings: Thrust bearings. *Journal of Lubrication Technology*, p. 810 - 817, oct.
- HARRISON, W. J. (1913). The hydromechanical theory of lubrication with special referende to air as a lubricant. *Trans. Camb. Phil. Soc.*, v. 2283, p. 39-54.
- HSING, F. C. (1971). The effect of fluid inertia on a porous thrust plate – an analytical solution. *Journal of Lubrication Technology*, *Trans. ASME*, v. 93, n. 1, p. 202 – 206.
- ISHIZAKI, K. & NANKO, M. (1995). A hot isostatic process for fabricating porous materials. *Journal of Porous Material*, v.1, p. 19 – 27.

- JAIN et al. (1997). Misaligned journal effects in liquid hydrostatic non-recessed journal bearings. *Wear*, v. 210, p. 67 - 75.
- KANAI, M. (1990). Air bearing lead screw and nut using porous material. *Bulletim of JSPE*, v. 56 (12), p. 2201 - 2207.
- KILMISTER, G. T. F. (1969). The use of porous materials in externally pressurized porous gas bearings. *Powder Metallurgy*, v. 12 (24), p. 400 - 409.
- KINGSBURY, A. (1897). Experiments with an air lubricated journal. I. *Amer. Soc. Nav. Engrs*, v. 9, p. 267 - 292.
- KWAN, Y.B.P. (1996). Processing and fluid flow characteristics of hot isostatically pressed porous alumina for aerostatic bearing applications. Cranfield. Ph.D. Thesis – Cranfield Institute of Technology.
- KWAN, Y.B.P. & CORBETT, J. (1998). Porous aerostatic bearings – an update review. *Wear*, v. 222, p. 69 – 73.
- MCKEOWN, P. A. (1987). The role of precision engineering in manufacturing of the future. *Annals of CIRP*, v. 36, n.2, p. 495 - 501.
- MOBIL (1979). *Fundamentos da lubrificação*, Mobil Oil do Brasil.
- MORI, H. et al (1965). Theoretical and experimental analysis of externally pressurized porous gas bearings. *Journal of Basic Engineering, Trans. ASME*, v. 87, p. 622 - 630.
- NORTON, A. E. (1942). *Lubrication*. Nova York, McGraw-Hill, 242p.
- PALMGREN, A. (1959). *Ball and roller bearing engineering*. Philadelphia, S. H. Burbank, 255p.

- POLONE, J. & GOREZ, R. (1980). The use of ground porous materials in gas lubrication. *Wear*, v. 60, p. 349 - 356.
- POWELL, J. W. (1970). Design of aerostatics bearings, London, The Machinery Publishing Co. Ltd.
- PURQUÉRIO, B. M. e BALESTRERO, L. A. (1991). Mancais fluidicos aerostáticos com ranhuras de alimentação. *Máquinas e Metais*, p. 49-58, abr.
- PURQUÉRIO, B. M. (1994). O torneamento de ultraprecisão já é possível no Brasil. *Máquinas e metais*, p. 106 - 116.
- OSMAN et al. (1996). Experimental assessment of hydrostatic thrust bearing performance. *Tribology International*, v. 29, n. 3, p. 233 - 239.
- RANISCK, W. H. (1974). Porous graphite air-bearing components as applied to machine tools. *SME Technical Report MRR 74-02*.
- ROBLEE, J. M., MOTE JR., C. D. (1990). Design of externally pressurized gas bearing for stiffness & damping. *Tribology International*, v.23, n.5, p. 333 – 345, oct.
- ROWE et al. (1991) A knowledge – based system for the selection of fluid film journal bearings. *Tribology International*, v. 24, n. 5, p. 291 - 297.
- SHEINBERG, S. A. & SHUSTER, V. G. (1960). Resistance to vibration of hydrostatic thrust bearing. *Machine and Tooling*, v. 31, p. 2013 - 2029.
- SHEPPARD, L. M. (1992). Trends in HIP equipment capabilities. *Ceramic Bulletin*, v.71, n.3, p. 323 - 327.
- SLOCUM, A. (1992). Precision Machine Design. New Jersey, Prentice Hall.

- STOWELL, T. B. (1971). Pneumatic hammer in a gas lubricated externally pressurized annular thrust bearing. *Journal of Lubrication Technology*, v. 93, p. 498 - 503.
- TRIMM, D. L., STANISLAUS, A. (1986). The control of pore size in alumina catalyst supports: A review. *Applied Catalysis*, v. 21, p. 215 - 238.
- VAN BEEK, A. & OSTAYEN, R. A. J. (1997). Analytical solution for tilted hydrostatic multi-pad thrust bearings of infinite length. *Tribology International*, v. 30, n. 1, p. 33 - 39.
- VAN BEEK, A. & SEGAL, A. (1997). Rubber supported hydrostatic thrust bearings with rigid bearing surfaces. *Tribology International*, v. 30, n. 1, p. 47 - 52.
- WECK, J. (1984). *Handbook of machine tools*, John Wiley & Sons, v.1.
- WILLIS, R. (1928). On the produced on a flat plate when opposed do a stream of air issuing from an orifice in a plane surface. *Trans. Camb. Phil. Soc.*, v.3, p. 129 - 141.
- YOSHIMOTO, S et al. (1999). Dynamic tilt characteristics of aerostatic rectangular double-pad thrust bearings with compound restrictors. *Tribology International*, v. 32, p. 731 - 738.
- ZAMPESE, B. (1980). *Mancais de rolamentos*. São Paulo, Universidade de São Paulo, 183p.