**BANCO DE ENSAIOS PARA MANCAIS
AEROSTÁTICOS AXIAIS PROJETO
CONSTRUÇÃO E TESTES
EXPERIMENTAIS**

Benedito de Moraes Purquerio

DEDALUS - Acervo - EESC

31100042446

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

BANCO DE ENSAIOS PARA MANCAIS AEROSTÁTICOS AXIAIS
PROJETO CONSTRUÇÃO E TESTES EXPERIMENTAIS

Benedito de Moraes Purquerio*

Dissertação apresentada ao
Departamento de Engenharia
Mecânica da EESCUSP para
obtenção do título de
Mestre.

* Engenheiro Mecânico, Professor do Departamento de Engenharia Mecânica - EESCUSP.

SÃO CARLOS

1975

FICHA BIBLIOGRÁFICA

PURQUERIO, Benedito de Moraes - *Banco de ensaios para mancais aerostáticos axiais: projeto construção e testes experimentais.* São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos-USP, 1975. 87p. Tese.

Resumo: Foi projetado e construído um banco de ensaios para experimentos com mancais aerostáticos axiais. Foram ensaiados vários mancais axiais e obtiveram-se as características de capacidade de carga e rigidez em função da folga. Os resultados obtidos foram comparados com os teóricos e discutidos os problemas encontrados.

Unitermos: Banco de Ensaios. Mancais Aerostáticos Axiais.

ABSTRACT

PURQUERIO, Benedito de Moraes - *Banco de ensaios para mancais aerostáticos axiais: projeto construção e testes experimentais.* São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos-USP, 1975. 87p. Tese.

Abstract: The design and construction of a test rig for experiments with aerostatic thrust bearings were developed. The load carrying capacity and stiffness characteristics were obtained as function of clearance for several thrust bearings under test. The results obtained were compared with the theory and discussed.

AGRADECIMENTOS

Externamos nossos agradecimentos as seguintes pessoas:

- Prof. Dr. Rosalvo Tiago Ruffino, orientador do presente trabalho, pelas suas sugestões e colaboração durante sua realização.

- Colegas João Lirani; José Roberto Gambarini e Osvaldo Luis Agostinho pela colaboração e incentivos prestados.

- Sr. Alan Joseph Munday pelas sugestões no projeto do banco de ensaios.

- Sr. Reonildo Zambom, técnico de laboratório, pelos trabalhos de execução dos diversos componentes do banco de ensaios.

- Desenhistas do Departamento de Engenharia Mecânica, pelos desenhos realizados.

- Sr. Marto de Souza, pelo trabalho fotográfico realizado.

- Todos aqueles que, direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

Agradecemos às entidades abaixo relacionadas, pelos auxílios concedidos, os quais tornaram possível a realização deste trabalho.

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

FAPESP - Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo

FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos

À Maria Cecília

José

Olázia

BANCO DE ENSAIOS PARA MANCAIS AEROSTÁTICOS AXIAIS
PROJETO CONSTRUÇÃO E TESTES EXPERIMENTAIS

ABREVIATURAS	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
1- INTRODUÇÃO	21
2- MANCAIS A GÁS	23
2.1- Generalidades	23
2.2- Tipos de Mancais a Gás	25
2.2.1- Mancais Aerodinâmicos	25
2.2.2- Mancais de Película Comprimida	27
2.2.3- Mancais Aerostáticos	28
2.2.4- Resumo das Características dos Mancais a Gás	31
2.2.5- Aplicações dos Mancais a Gás	32
2.3- Análise dos Mancais Aerostáticos	33
2.3.1- Mancais Radiais	33
2.3.2- Mancais Axiais	36
2.3.2.1- Funcionamento	36
2.3.2.2- Rigidez e capacidade de carga	38
3- BANCO DE ENSAIOS	39
3.1- Generalidades	39

3.2- Descrição do Banco de Ensaio	40
3.3- Construção dos Componentes do Banco de Ensaio	43
3.3.1- Conjunto do Eixo	43
3.3.2- Mancais Radiais	46
3.3.2.1- Cálculos dos mancais radiais	46
3.3.2.2- Detalhes construtivos	48
3.3.3- Mancais Axiais	49
3.3.3.1- Mancal de orifício central	50
3.3.3.2- Mancal anular	52
3.3.3.3- Cálculos dos mancais axiais	56
3.4- Circuito Pneumático	57
3.4.1- Utilização do Circuito Pneumático	58
3.5- Equipamento de Medida	60
4- ENSAIOS E RESULTADOS	61
4.1- Descrição dos Ensaio	61
4.2- Resultados Obtidos	62
4.3- Análise dos Resultados	74
5- CONCLUSÕES	77
6- BIBLIOGRAFIA	79
7- ANEXOS	81
7.1- Glossário	81
7.2- Desenhos do Banco de Ensaio	83

ABREVIATURAS

ϵ - razão de excentricidade no mancal radial. [-]

a - raio interno do mancal axial anular, raio do rebaixo do mancal axial de orifício central. [mm]

b - raio externo do mancal axial. [mm]

c - raio do anel de orifícios de alimentação do mancal axial anular. [mm]

d - diâmetro do orifício de alimentação. [mm]

h - folga entre as superfícies do mancal. [μm]

h_0 - folga radial média no mancal radial. [μm]

l - distância dos orifícios de alimentação às bordas do mancal radial. [mm]

n - número de orifícios por carreira no mancal radial, número de orifícios no mancal axial.

C_L - $\left(= \frac{W}{(P_o - P_a)LD} \right)$ coeficiente de carga do mancal radial. [-]

C_{LA} - $\left(= \frac{W}{b^2 \pi (P_o - P_a)} \right)$ coeficiente de carga do mancal axial. [-]

D - diâmetro do mancal radial. [mm]

K - $\left(= \frac{dW}{dh} \right)$ rigidez do mancal. [N/m]

$$K_g \left| - \left(= \frac{P_d - P_a}{P_o - P_a} \right) \right| \text{ fator de pressão. } [-]$$

K_{g0} - fator de pressão para o mancal radial na posição concêntrica $[-]$

L - comprimento do mancal radial. $[mm]$

M - consumo de ar do mancal. $[m^3/s]$

P_a - pressão atmosférica. $[N/m^2]$

P_d - pressão à jusante dos orifícios de alimentação. $[N/m^2]$

P_o - pressão da fonte de alimentação. $[N/m^2]$

W - carga no mancal. $[N]$

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1- Organograma das Sub-Áreas de uma Máquina	24
Fig. 2.2- Funcionamento do Mancal Aerodinâmico	26
Fig. 2.3- Funcionamento do Mancal de Película Comprimida	27
Fig. 2.4- Funcionamento do Mancal Aerostático	28
Fig. 2.5- Mancais Aerostáticos Pré-Carregados	30
Fig. 2.6- Mancal Aerostático Radial	34
Fig. 2.7- Mancais Aerostáticos Axiais	37
Fig. 2.8- Característica Carga x Folga dos Mancais Axiais	39
Fig. 3.1- Esquema do Banco de Ensaio para Mancais Aerostáticos Axiais	40
Fig. 3.2- Banco de Ensaio para Mancais Aerostáticos Axiais	43
Fig. 3.3- Aspectos da Eletrodeposição de Cromo Duro no Conjunto do Eixo	45
Fig. 3.4- Detalhe do Conjunto do Eixo	45
Fig. 3.5- Esquemas do Conjunto Eixo e Mancais Radiais Utilizados para os Cálculos	46
Fig. 3.6- Lapidadores Utilizados nos Mancais Radiais e Axiais ..	48

Fig. 3.7- Esquema do Mancal de Orifício Central	51
Fig. 3.8- Detalhe do Mancal de Orifício Central	51
Fig. 3.9- Esquema do Mancal Anular	52
Fig. 3.10- Distribuição dos Orifícios de Alimentação para os Man- cais Anulares	53
Fig. 3.11- Detalhe do Mancal Anular	54
Fig. 3.12- Detalhes dos Bujões de Alimentação	55
Fig. 3.13- Esquema do Circuito de Alimentação Pneumática do Banco de Ensaios	59
Fig. 4.1- Capacidade Carga x Folga para o Mancal nº1 (C/R, n = 6) ..	63
Fig. 4.2- Capacidade de Carga x Folga para o Mancal nº 2 (C/R, n = 8)	64
Fig. 4.3- Capacidade de Carga x Folga para o Mancal nº 3 (C/R, n = 12)	65
Fig. 4.4- Capacidade de Carga x Folga para o Mancal nº 4 (S/R, n = 6)	66
Fig. 4.5- Capacidade de Carga x Folga para o Mancal nº 5 (S/R, n = 8)	67
Fig. 4.6- Capacidade de Carga x Folga para o Mancal nº 6 (S/R, n = 12)	68
Fig. 4.7- Capacidade de Carga x Folga para o Mancal nº 7 (S/R, n = 1)	69
Fig. 4.8- Rigidez Axial dos Mancais nº1(C/R,n=6) e nº4(S/R,n=6)..	70

Fig. 4.9- Rigidez Axial dos Mancais nº2(C/R,n=8) e nº5(S/R,n=8)..	71
Fig. 4.10- Rigidez Axial dos Mancais nº 3 (C/R, n = 12) e nº 6 (S/R, n = 12)	72
Fig. 4.11- Rigidez Axial do Mancal nº 7 (C/R, n = 1)	73
Fig. 7.1- Desenho de Conjunto do Banco de Ensaio	83
Fig. 7.2- Desenho do Eixo	84
Fig. 7.3- Desenho dos Mancais Radiais	85
Fig. 7.4- Desenho do Mancal Anular	86
Fig. 7.5- Desenho do Mancal de Orifício Central	87

LISTA DE TABELAS

Tab. 2.1- Características dos Três Tipos de Mancais a Gás	31
Tab. 2.2- Aplicação dos Mancais a Gás	32
Tab. 3.1- Resumo dos Cálculos dos Mancais Aerostáticos Radiais ..	47
Tab. 3.2- Resumo dos Cálculos dos Mancais Aerostáticos Axiais ...	56
Tab. 3.3- Especificações dos Componentes Utilizados no Circuito Pneumático	57
Tab. 3.4- Especificações do Equipamento de Medida Utilizado	60
Tab. 4.1- Características Principais dos Mancais Ensaçados	61
Tab. 4.2- Quadro Comparativo Entre os Valores Calculados e os Re- sultados Obtidos	74

BANCO DE ENSAIOS PARA MANCAIS AEROSTÁTICOS AXIAIS

PROJETO CONSTRUÇÃO E TESTES EXPERIMENTAIS

1- INTRODUÇÃO

★ Os estudos sobre a lubrificação com ar datam de há muito tempo. Em 1828, R. Willis publicou um artigo sobre os efeitos da pressão produzidos entre duas superfícies planas e opostas, tendo em uma delas um orifício alimentado com ar sob pressão. Além dos efeitos da pressão, casualmente, sem intenção definida, ele descobriu a lubrificação aerostática.

★ Aparentemente, foi o francês G. Hirn, que em 1854, mencionou pela primeira vez o emprego do ar como lubrificante, dizendo "que o ar atmosférico pode, em certas circunstâncias, ser o melhor de todos os lubrificantes".¹ Depois disto, abriu-se uma lacuna no estudo da lubrificação a ar, até que em 1897, A. Kingsbury construiu o primeiro mancal radial lubrificado a ar e publicou vários resultados experimentais. Até essa época então, os lubrificantes usuais eram a água ou o óleo. Foi em 1913, que o problema da lubrificação a ar foi analisado teoricamente, quando W. J. Harrison apresentou um estudo sobre os mancais planos e radiais.

★ Somente a partir de 1950 que a tecnologia da lubrificação a ar se desenvolveu notadamente, devido às vantagens especiais, que os mancais lubrificados a ar ofereciam com relação aos mancais convencionais.

¹ HIRN, M. G. - Sur les principaux phénomènes que présentent les frottements médiats, et sur les diverses manières de déterminer la valeur mécanique des machines. Soc. ind. Mulhouse Bull., 26:200, jul. 1854.

* Os mancais a gás podem ser utilizados tanto para alta, como baixa temperatura e o seu desempenho mantém-se satisfatório em uma faixa larga de variação térmica.

O baixo atrito, a facilidade com que se obtém o suprimento de ar e o seu grau de limpeza, foram os fatores principais, que levaram a utilização destes mancais em componentes de computadores e equipamentos de alta rotação. São particularmente indicados para equipamentos de centrais nucleares pelo fato de não serem afetados pela radioatividade e não necessitarem de manutenção, a menos da alimentação pneumática.

Estes mancais apresentam um excelente desempenho, quando utilizados em instrumentos de precisão e metrologia pelo fato de ter baixo nível de ruído e atrito praticamente nulo.

Os mancais lubrificados a ar apresentam baixa capacidade de carga, quando comparados com os mancais que empregam lubrificante líquido, em decorrência da viscosidade do ar ser muito menor que a dos líquidos. Porém, podem ser projetados para suportarem grandes cargas, tais como os mancais utilizados em geradores e turbinas.

Os mancais lubrificados a ar são utilizados ainda em componentes de máquinas têxteis, máquinas ferramentas, instrumentos médico-dentários, circuladores, refrigeradores e liquefatores de gases.

Procurou-se externar neste trabalho, toda a tecnologia adquirida no projeto e construção de um banco de ensaios, através do qual foram obtidos e avaliados dados experimentais sobre mancais aerostáticos axiais.

Na concepção do banco de ensaios, procuraram-se adaptações convenientes que permitiram levantar as principais características operacionais, tanto dos mancais de orifício central, como dos mancais anulares. Apesar do banco de ensaios poder ser adaptado

para ensaios de mancais em rotação, fizeram-se somente os testes es
táticos.

Avaliaram-se os métodos de projeto para mancais ae
rostáticos, bem como fundamentaram-se as bases iniciais para o pro
jeto de máquinas equipadas com estes mancais.

2- MANCAIS A GÁS

Neste capítulo, será feita uma análise dos mancais a gás, particularmente voltada aos mancais aerostáticos axiais. Co
mo é mais simples atingir os objetivos, incluindo informações rela
tivas a outros tipos de mancais a gás, fez-se um apanhado geral de toda a matéria.

2.1- Generalidades

A qualidade de uma máquina está estreitamente liga
da a sua rigidez. Portanto, a qualidade da máquina depende da rigi
dez de cada um dos seus componentes, tais como: a estrutura, mecanis
mos de acionamento, juntas, acoplamentos, eixos e mancais.

O conjunto eixo-mancais, particularmente os últi
mos representam, na maioria das vezes, o fator determinante da qua
lidade da máquina, pois garantem a precisão de giro, a repetibili
dade de movimento, a capacidade de carga e a rigidez da mesma. Desta forma, os requisitos rigorosos relativos a precisão operacional de uma máquina, devem, por conseguinte, ser confrontados com os requi
sitos que os mancais desta máquina devem satisfazer.

Portanto, tem-se intensificado as pesquisas no intuito de se obter mancais que desempenhem cada vez melhor as necessidades peculiares de cada tipo de utilização.

Fig. 2.1- Organograma das Sub-Áreas de uma Máquina

Para que o enfoque do problema se tornasse mais claro, incluiu-se na figura 2.1 o organograma de sub-áreas de uma máquina, onde são evidenciados os mancais, particularmente os mancais a gás.

Nem sempre, os mancais a gás substituem satisfatoriamente qualquer outro mancal. Por outro lado, os demais tipos de mancais, como por exemplo, os de elementos rolantes tem os limites de utilização menores quando se deseja alta velocidade, baixo atrito, repetibilidade de movimento, temperatura e aplicações especiais. Considerações semelhantes poderiam ser feitas relativamente a outros tipos de mancais.

2.2- Tipos de Mancais a Gás

Existem basicamente três tipos de mancais a gás: aerodinâmico, película comprimida e aerostático. Cada um deles utiliza princípios de operação diferentes. Apesar da sua denominação, o ar é o lubrificante mais comumente utilizado nos mancais a gás.

2.2.1- Mancais Aerodinâmicos

Os mancais aerodinâmicos, também chamados de auto-atuantes, geram sua pressão de sustentação na película de ar entre as superfícies em movimento relativo. O mecanismo é semelhante ao que ocorre nos mancais hidrodinâmicos.

A figura 2.2 mostra o princípio de funcionamento do mancal aerodinâmico. Em (a) tem-se o perfil de velocidade do ar entre as duas superfícies em movimento relativo. Como a vazão é função da folga entre superfícies, se $h_1 \neq h_2$ (b), a vazão para cada folga será diferente. Quando a vazão se iguala (c), o perfil de velocidade muda se ocorrer uma mudança na pressão no filme de ar. Assim, o gradiente de pressão interna, gerado no movimento relativo

das superfícies, permite que o mancal suporte cargas.

Fig. 2.2- Funcionamento do Mancal Aerodinâmico

Como o perfil de velocidade decorre da viscosidade do fluido, a principal diferença entre os mancais aerodinâmicos e hidrodinâmicos, vem a ser a ordem de grandeza das forças geradas pela viscosidade.

A viscosidade cinemática do ar representa aproximadamente $1/1000$ da viscosidade cinemática de um óleo com $2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (Óleo SAE 10). Portanto, os mancais aerodinâmicos apresentam uma capacidade de carga relativamente pequena quando comparados com os mancais hidrodinâmicos. Porém, possuem uma série de vantagens tais como:

- muito pouco atrito
- operam a altas rotações
- toleram alta e baixa temperatura
- toleram radiação
- não contaminam o sistema
- tem características constantes (a viscosidade varia pouco com a temperatura)

- operam em espaços fechados
- não tem problemas de cavitação

2.2.2- Mancais de Película Comprimida

Duas superfícies em movimento relativo na direção de sua normal, tendo um fluido entre elas, geram forças entre estas superfícies, chamadas forças de película comprimida ou de esmagamento de película. Se o fluido for líquido, estas forças serão de amortecimento. Com os gases, as forças serão de amortecimento, se a velocidade (frequência) de movimento for baixa e neste caso, todos os mancais a gás terão amortecimento. Quando a velocidade (frequência) for alta, acima de 20kHz, e o movimento for oscilatório, o gás fluirá somente nas bordas do mancal, conforme figura 2.3. O gás no centro do mancal será comprimido (esmagado) e expandido a cada ciclo do movimento, gerando uma pressão média, que será maior que a externa (atmosférica). Esta pressão interna gerada permitirá que o mancal suporte cargas.

Fig. 2.3- Funcionamento do Mancal de Película Comprimida

Os mancais de película comprimida tem aplicações em laboratórios, pois o movimento oscilatório necessário para gerar a pressão de sustentação, deve ser suprido por geradores de vibração.

2.2.3- Mancais Aerostáticos

Nos mancais aerostáticos, a pressão da película do ar entre as superfícies, mantém-se através do suprimento de uma fonte de alimentação externa à pressão constante. A medida que se restringe a vazão de ar entre a fonte de alimentação e a folga do mancal, ocorre um correspondente aumento da rigidez da película de ar. Se não houvesse restrição da vazão de ar, a pressão do mancal seria constante, conforme mostra a figura 2.4. No caso, obtém-se a

Fig. 2.4- Funcionamento do Mancal Aerostático

restrição da vazão através da diminuição do diâmetro do orifício de alimentação.

A máxima rigidez ocorre aproximadamente a 2/3 da carga máxima. Para esta condição e para um determinado valor do restritor da vazão tem-se a relação, segundo Powell:

$$K \propto \frac{\bar{W}}{h} \quad (2.1)$$

Para aumentar a rigidez, seria necessário aumentar a carga W ou diminuir a folga h . Porém, qualquer mudança no sistema, tanto na pressão de alimentação, como na geometria do mancal, não irá alterar a rigidez. Portanto, para se aumentar a capacidade de carga de um mancal e conseqüentemente a sua rigidez, seria necessário a utilização do pré-carregamento.

O pré-carregamento acontece normalmente nos mancais radiais. Para ser obtido nos mancais axiais torna-se necessária a utilização de um mancal duplo, conforme pode ser visto na figura 2.5.

Os mancais aerostáticos podem ser utilizados quando se deseja:

- Capacidade de carga com velocidade zero
- Alta rotação
- Repetibilidade de movimento
- Mancais que não podem ser contaminados nem contaminam o ambiente
- Rigidez elevada
- Operar em temperaturas altas e baixas
- Vida longa, sem manutenção, exceto do sistema pneumático de alimentação.

Fig. 2.5- Mancais Aerostáticos Pré-Carregados

a) Radial

b) Axial

c) Diagrama Carga x Folga

2.2.4- Resumo das Características dos Mancais a Gás

A tabela 2.1 mostra as características dos três tipos principais de mancais a gás.

TIPO	AERODINÂMICO	PELÍCULA COMPRIMIDA	AEROSTÁTICO
Forma
Fonte de Pressão	Movimento das Superfícies	Vibração das Superfícies	Gás sob Pressão
Atrito	Baixo, exceto nas partidas e paradas	Baixo	Baixo
Materiais	Especiais, devido às partidas e paradas	Piezoeletricos para gerar vibrações	Resistentes à Corrosão
Temperatura	—	Afeta o material Piezoeletrico	—
Capacidade de Carga	2º	3º	1º
Rigidez	2º	3º	1º
Estabilidade	2º	—	1º
Custo	2º	3º	1º
Limpeza do Ambiente	Deve ser limpo	Deve ser limpo	Não afeta
Vida	Desgaste nas partidas e paradas	Possível fadiga dos componentes	Depende sobretudo do sistema pneumático
Ruido	Nenhum	Do vibrador	Nenhum (Pouco)

Tabela 2.1 - Características dos Três Tipos de Mancais a Gás

X 2.2.5- Aplicações dos Mancais a Gás

X Procurou-se enumerar as possíveis aplicações dos mancais a gás, as quais são apresentadas na tabela 2.2. Utilizou-se nesta tabela a notação AD para mancais aerodinâmicos, AE para mancais aerostáticos e PC para película comprimida.

TIPO DE APLICAÇÃO	LOCAL DE APLICAÇÃO	NOTAÇÃO
Baixo Atrito	Dinamômetros para motores	AE
	Dispositivos para medir força em túneis de vento	AE
	Guias de instrumentos de medida	AE
	Giroscópios	PC, AE
Alta Precisão de Movimento	Metrologia	AE
	Mesas e cabeçotes de máquinas ferramentas	AE
Baixa Temperatura	Turbinas criogênicas de expansão	AE, AD
	Turbo-compressores	AE, AD
Alta Temperatura	Circuladores de gás para reatores nucleares	AD
Máquinas Especiais	Cortadores ópticos	AE
	Medidores de forma	AE
	Canetas ortopédicas	AE
	Brocas dentárias	AE
Baixo nível de Ruído	Motores para submarinos	AE
Baixo nível de Vibração	Giroscópios	AD
Alta Velocidade	Ressonância magnética de rotação (física)	AD
	Centrifugadoras	AD
Grandes Cargas	Geradores homopolares (física)	AE
	Mesas de Máquinas Ferramentas	AE

continua

		conclusão
TIPO DE APLICAÇÃO	LOCAL DE APLICAÇÃO	NOTAÇÃO
Baixo Desgaste	Medidores de vazão	AE
	Computadores	AD
	Máquinas têxteis	AD
Alta Pressão	Turbinas a Vapor	AE
	Indústria química	AE
Radiação	Centrais nucleares	AD, AE

Tab. 2.2- Aplicação dos Mancais a Gás

2.3- Análise dos Mancais Aerostáticos

Com relação aos mancais aerostáticos, dependendo da sua função, eles podem ser radiais ou axiais. Os mancais radiais suportam os esforços radiais dos eixos e tem normalmente a forma cilíndrica. Da mesma forma, os mancais que suportam as cargas axiais dos eixos são os mancais axiais, formados usualmente por superfícies planas circulares ou anulares. Tanto os mancais radiais, como os axiais podem ter a forma cônica ou esférica.

2.3.1- Mancais Radiais

Apesar dos mancais radiais não participarem dos objetivos principais deste trabalho, serão comentados alguns dos seus aspectos importantes.

São constituídos normalmente de buchas cilíndricas, nas quais são usinados radialmente os orifícios de alimentação. Podem apresentar uma ou duas carreiras de orifícios igualmente espaçados, cuja quantidade varia em função das característi-

cas de projeto do mancal. A figura 2.6 mostra o esquema de um mancal aerostático radial com duas carreiras de orifícios.

Não há diferença de pressão

A diferença de pressão suporta a carga W

Fig. 2.6- Mancal Aerostático Radial

O funcionamento do mancal aerostático radial pode ser explicado de acordo com a figura 2.6. O ar comprimido do compressor é suprido ao reservatório a montante dos orifícios do mancal a uma pressão P_0 . Através dos orifícios de alimentação, ele penetra na folga h do mancal a uma pressão P_d , menor que a do reservatório e se escoa até a periferia da bucha para a atmosfera a uma pressão P_a .

Não se considerando o carregamento do eixo e se desprezando seu peso próprio, este adota a posição concêntrica na bucha do mancal. Neste caso, não existe nenhuma variação de pressão em toda a circunferência do mancal ou seja, $P_{d1} = P_{d2}$. Portanto, as forças de pressão no eixo estão em equilíbrio.

Quando se aplica um carregamento no eixo na direção vertical, este deflete nesta direção, de forma que a folga na parte superior do mancal aumenta, e na inferior diminui. Diminui-se então a resistência à vazão de ar na parte superior do mancal de forma que, maior quantidade de ar escapa para a atmosfera. Esse aumento na vazão provoca o aumento da queda de pressão através dos orifícios de alimentação e a pressão P_{d1} diminui. Na parte inferior do mancal, a resistência à vazão de ar para a atmosfera é aumentada de forma que menor quantidade de ar flui através dos orifícios. Assim, a queda de pressão nestes orifícios é reduzida e a pressão P_{d2} aumenta. Assim, a diferença de pressão existente $(P_{d2} - P_{d1})$ se equilibra com a carga aplicada.

Para qualquer carga aplicada nos limites de capacidade do mancal, existe uma posição de equilíbrio para o eixo. O coeficiente que relaciona este fato é a razão da excentricidade ϵ , definida como a deflexão radial efetiva do eixo do mancal que se expressa como uma fração da folga radial média.

Usualmente determina-se a capacidade de carga de um mancal radial em função do coeficiente de carga C_L onde,

$$C_L = \frac{W}{(P_o - P_a) LD} \quad (2.2)$$

e, W = carga (MLT^{-2})

L = comprimento do mancal (L)

D = largura do mancal (L)

P_o = pressão de alimentação ($ML^{-1} T^{-2}$)

O coeficiente de carga, para uma dada razão de excentricidade, depende do fator de pressão K_{go} que, para uma posição concêntrica do eixo, é expresso pela relação:

$$K_{go} = \frac{P_d - P_a}{P_o - P_a} \quad (2.3)$$

onde, P_0 = pressão no reservatório

P_a = pressão atmosférica

P_d = pressão na folga do mancal

O significado físico do fator de pressão K_{g0} , conforme mostra a relação (2.3), vem a ser a queda de pressão na folga do mancal, como uma fração da queda total de pressão disponível, quando o mancal não está carregado. Usualmente, o valor ótimo de K_{g0} para projeto dos mancais radiais é 0,4, o qual proporciona-lhe a máxima capacidade de carga.

A geometria dos orifícios de alimentação também influi no coeficiente de carga dos mancais radiais. Os orifícios sem rebaixo proporcionam ao mancal uma redução de 30% de sua capacidade de carga, quando comparados com orifícios com rebaixo.

2.3.2- Mancais Axiais

2.3.2.1- Funcionamento

Os dois tipos principais de mancais aerostáticos axiais são mostrados na figura 2.7.

Nesta figura, tem-se em (a) um mancal de orifício central. Neste mancal, o ar fornecido a uma pressão P_0 , penetra através do orifício de diâmetro d no rebaixo circular de raio a onde a pressão P_d é uniforme. Do rebaixo, o ar flui radialmente entre as superfícies do mancal separadas pela folga h até a sua periferia. Quando alcança as bordas do mancal o ar escapa para a atmosfera com pressão P_a .

O mancal (b) da mesma figura é alimentado através de um anel de orifícios de raio c . Os orifícios usualmente possuem rebaixos anulares interligando-os, ou recessos circulares individuais. Neste mancal, o ar flui radialmente para as bordas externa

(raio b) e interna com (raio a).

O funcionamento dos mancais axiais é semelhante ao dos radiais. Quando se aplica uma carga perpendicular às superfícies do mancal, ocorre uma redução na folga entre elas com um correspondente aumento da resistência à vazão de ar para a atmosfera. Com a redução da vazão do mancal, diminui-se também a queda de pressão nos orifícios e a pressão no mancal aumenta, até atingir as condições de equilíbrio, onde as forças de pressão na folga se igualam à carga aplicada.

Fig. 2.7- Mancais Aerostáticos Axiais

2.3.2.2- Rigidez e capacidade de carga

Nos mancais aerostáticos axiais, a relação entre a carga e a folga não é linear. Portanto, torna-se necessário considerar não somente a capacidade de carga do mancal, mas também a sua rigidez axial, ou seja, a razão da variação da capacidade de carga com a folga.

A variação da carga em função da folga nos mancais aerostáticos axiais, ocorre conforme mostra a figura 2.8, onde a folga reduz-se com o aumento do carregamento. No princípio reduz-se lentamente, depois rapidamente, para em seguida, reduzir-se lentamente outra vez. Em outras palavras, a inclinação da curva de carga contra a folga e conseqüentemente a rigidez do mancal, apresenta o valor máximo para a folga h de projeto.

Usualmente projetam-se os mancais para rigidez máxima e esta ocorre para um fator de pressão $K_{go} = 0,69$. Assim, os dados de projeto são calculados em função destes fatores:

É usual se expressar a capacidade de carga dos mancais aerostáticos axiais através do seu coeficiente de carga, C_{LA} onde:

$$C_{LA} = \frac{W}{\pi b^2 (P_o - P_a)} \quad (2.4)$$

$$e W = C_{LA} \pi b^2 (P_o - P_a) \quad (2.5)$$

Normalmente projetam-se os mancais para rigidez máxima e esta ocorre para um fator de pressão $K_{go} = 0,69$, segundo Powell. Assim, os parâmetros adotados para o projeto são escolhidos em função destes dados, ou seja, a capacidade de carga e o fator de pressão. Os cálculos apresentados na tabela 3.2 foram efetuados adotando-se estes fatores.

Fig. 2.8- Característica Carga x Folga dos Mancais Axiais

3- BANCO DE ENSAIOS

3.1- Generalidades

Dentre as características inerentes aos mancais axiais que contribuem para o aparecimento de diferentes situações de ensaio, destacam-se: as de forma, as de geometria e as de operação. As características de forma dos mancais axiais estão ligadas à concepção dos mesmos, ou seja, especificam o tipo de mancal (central ou anular) ou o tipo de alimentação utilizada (orifício ou ranhura). As características geométricas, por sua vez, definem as variáveis principais de projeto dos mancais, como por exemplo, o número de orifícios de alimentação e as respectivas dimensões, os valores das di

mensões dos rebaixos, as relações entre os diâmetros interno e externo do mancal, bem como a folga entre as superfícies. As características de operação abrangem as seguintes variáveis: pressão e vazão do ar comprimido, a temperatura, potência consumida e os coeficientes de carga, pressão e vazão.

3.2- Descrição do Banco de Ensaio

O banco de ensaios, objeto deste trabalho, é mostrado esquematicamente na figura 3.1, onde se destacam os seus componentes principais. Os desenhos do banco de ensaios encontram-se no anexo 7.2.

Fig. 3.1- Esquema do Banco de Ensaio para Mancais Aerostáticos Axiais

Considerando a figura 3.1, pode-se notar que todo o conjunto é sustentado pelo suporte principal (H) e pela base de fixação (A). O suporte principal é dotado de três pinos (F) que, além de constituírem os parafusos reguladores internos, são também os fixadores do disco suporte (I), no qual é montada a bucha (J) dos mancais aerostáticos radiais. Juntamente com os parafusos reguladores internos, atuam os parafusos reguladores externos (D) que formam um sistema diferencial de roscas, que permite um posicionamento muito preciso do disco suporte (E) dos mancais aerostáticos axiais (C). A diferença dos passos das roscas dos parafusos reguladores externos e internos, permite uma aproximação ou afastamento do disco suporte e conseqüentemente dos mancais axiais nele montados de dois centésimos de milímetro para cada volta completa do parafuso regulador externo. A folga das roscas dos parafusos é eliminada por molas de compressão.

O eixo, suportado pelos mancais aerostáticos radiais, é constituído por um corpo cilíndrico (L), um disco de fixação (G) e um disco (B) que vem a ser a superfície oposta do mancal axial. O eixo não pôde ser construído em uma única peça devido aos problemas de fabricação que serão discutidos a seguir.

Para que fôsse possível controlar o carregamento dos mancais axiais a serem ensaiados, foi montada na extremidade da bucha dos mancais radiais, uma câmara (M), cuja pressão interna controlada atua sobre a superfície exposta do eixo, fornecendo a força axial necessária aos ensaios. A pressão da câmara é controlada através de um regulador de pressão e medida com manômetro. Nesta câmara foi convenientemente montado um excitador (Q) constituído por um pino móvel que desliza na guia (R) vedada com anéis de borracha. A função deste é excitar os mancais axiais em ensaio, através de pequenos choques mecânicos entre as extremidades do pino e do eixo para que as vibrações produzidas pelos choques e amortecidas pela película de ar dos mancais, possam ser medidas e avaliadas para os di

versos tipos de mancais.

Para que a distribuição da pressão nos mancais aerostáticos radiais fôsse uniforme em toda a circunferência, foram previstos os anéis de alimentação (P), cuja parte central é rebaixada formando uma câmara de distribuição para o ar comprimido. A vedação entre a bucha e os anéis foi feita através de anéis de borracha. Analogamente, para os mancais axiais também foi previsto um disco de alimentação (N), para que a pressão fôsse distribuída uniformemente para todos os orifícios de alimentação. No caso do mancal de orifício central, a alimentação é feita por um bocal de alimentação no centro do mancal.

A figura 3.1 mostra ainda as entradas de ar comprimido no banco de ensaios. A entrada I dos mancais axiais é controlada por um medidor de vazão e por um regulador de pressão; as entradas II e III dos mancais radiais e câmara de pressão respectivamente, são controladas somente por reguladores de pressão.

Todos os componentes do banco de ensaios, com exceção dos mancais axiais, uma vez montados e regulados, não necessitam de posterior ajustagem, permanecendo em suas posições definitivamente. Quanto aos mancais axiais, devido aos vários tipos e geometria a serem estudados, devem ser substituídos após cada ensaio. Isso tornou-se possível devido a relativa facilidade de troca dos mesmos, bem como o seu posicionamento em relação ao eixo do banco.

A figura 3.2 mostra o banco de ensaios para mancais aerostáticos axiais depois de montado.

Fig. 3.2- Banco de Ensaio para Mancais Aerostáticos Axiais

3.3- Construção dos Componentes do Banco de Ensaio

Na construção dos componentes do banco de ensaios utilizaram-se os processos convencionais de usinagem; porém, com relação ao eixo, mancais aerostáticos radiais e axiais, será feita uma descrição detalhada dos métodos utilizados.

3.3.1- Conjunto do Eixo

Com a finalidade de facilitar a construção do eixo do banco de ensaios, este foi projetado com três componentes de aço carbono ABNT-1045. Conforme pode ser visto na figura 3.1 é constituído por um corpo cilíndrico e dois discos a ele fixados. O corpo cilíndrico é sustentado por mancais aerostáticos radiais que lhe

fornecem rigidez suficiente para suportar o seu peso próprio, bem como o dos discos, além de permitir ao conjunto, deslocamentos axiais com baixo atrito.

Em um primeiro estudo, o eixo seria feito em uma única peça, porém, isso dificultaria a usinagem da superfície oposta do mancal, ou seja, a cabeça do eixo. Este problema estava ligado ao fato de que a referida superfície não poderia ter furo de centro para a usinagem entre pontas. Supondo que fôsse conseguido um bom torneamento do eixo sem fixação entre pontas, os problemas surgiriam quando se retificasse esta superfície, pois, tanto na retificação cilíndrica como na plana, não haveria condições de garantir o perpendicularismo desta superfície com relação ao eixo de rotação, dentro das tolerâncias necessárias. Projetou-se então, o eixo em três componentes separados e parafusados, o que veio facilitar muito a sua construção.

Após a usinagem básica e a retificação dos componentes do eixo, estes receberam um recobrimento com cromo duro para evitar a oxidação dos mesmos. Apesar do recobrimento por deposição eletrolítica com cromo duro, ser homogêneo em toda a superfície das peças recobertas, estas apresentaram nas bordas, acúmulo de material que foi eliminado. A figura 3.3 mostra alguns aspectos do recobrimento do eixo com cromo duro.

Todas as superfícies que foram tratadas, receberam uma camada uniforme de 0,04mm de espessura. Depois da retificação final para eliminação do acúmulo de material, esta espessura ficou reduzida para aproximadamente 0,02mm. O conjunto do eixo é mostrado na figura 3.4.

I-peça recoberta com cromo duro
II-deposição antes da usinagem
III-deposição restante da usinagem
IV-primeira retificação
V-retificação final

Fig. 3.3- Detalhes da Eletrodeposição de Cromo Duro no Conjunto do Eixo

Fig. 3.4- Aspecto do Conjunto do Eixo

3.3.2- Mancais Radiais

Os mancais aerostáticos radiais, componente (J) da figura 3.1, constituem o elemento suporte do eixo no banco de ensaios, que proporcionam sustentação adequada para o eixo e permitem o movimento axial deste com baixo atrito.

3.3.2.1- Cálculos dos mancais radiais

A figura 3.5 mostra os esquemas utilizados para o cálculo dos mancais radiais. Os cálculos foram baseados nos fundamentos fornecidos por Powell.

Fig. 3.5- Esquema do Conjunto Eixo e Mancais Radiais Utilizados para os Cálculos

A tabela 3.1, apresenta o resumo dos cálculos dos mancais utilizados no banco de ensaios, bem como os parâmetros adotados no desenvolvimento dos mesmos.

CARACTERÍSTICAS	MANCAL A	MANCAL B
Reação nos mancais (N)	33,3	18,3
Relação L/D	1,2	1,0
Diâmetro do mancal - D(mm)	50,0	50,0
Largura do mancal - L(mm)	60,0	50,0
Relação l/L	0,25	0,5
Número de orifícios - n	8	8
Diâmetro dos orifícios - d(mm)	0,3	0,3
Folga diametral - $2h_o$ (μm)	25,0	25,0
Capacidade de carga - W(N)	162,0	135,0
Pressão atmosférica - P_a (N/m ²)	10^5	
Pressão de alimentação - $(P_o - P_a)$ (N/m ²)	$4,14 \times 10^5$	
Coeficiente de excentricidade - ϵ	0,5	
Coeficiente de pressão - K_{go}	0,6	
Consumo de ar - M(m ³ /s)	$5,8 \times 10^{-4}$ (para os dois mancais)	

Tab. 3.1- Resumo dos Cálculos dos Mancais Aerostáticos Radiais

No desenvolvimento dos cálculos adotou-se no princípio um coeficiente de pressão $K_{go} = 0,4$, para a obtenção da capacidade de carga dos mancais, porém, no dimensionamento dos orifícios de alimentação, estes resultaram com diâmetros muito pequenos tornando-se impossível sua usinagem. Adotou-se então outro coeficiente de carga para calcular os orifícios e fez-se a correção da capacidade de carga dos mancais para este novo valor, ou seja

$K_{g_0} = 0,6$. Devido aos orifícios de alimentação dos mancais serem do tipo sem rebaixo, a capacidade de carga ficou ainda reduzida de 30%.

O consumo de ar nos mancais radiais também foi calculado baseando-se no último valor do coeficiente de pressão adotado.

3.3.2.2- Detalhes construtivos

Os mancais radiais foram construídos a partir de uma bucha de bronze de fundição contínua (70% Cu, 10% Sn e 20% Pb). Após a usinagem normal, foram feitos os orifícios de alimentação dos mancais do tipo sem rebaixo, usinados na própria bucha. O acabamento superficial obtido no mandrilamento dos mancais, condizia com as especificações. Porém, para reduzir os erros de forma e eliminar as rebarbas dos orifícios de alimentação, os mancais foram lapidados.

Para a lapidação dos mancais radiais foi construído o lapidador mostrado na figura 3.6 e utilizou-se alumina (de granulção 1000 dissolvida em querosene) como abrasivo.

Fig. 3.6- Lapidadores Utilizados nos Mancais Radiais e Axiais

Após a lapidação, foram feitos os testes de concentricidade dos orifícios de alimentação para verificar se a furação estava correta. O teste consistiu na injeção de água corrente nos orifícios de alimentação e na análise visual da homogeneidade dos jatos de água de cada orifício, bem como a sua ação simultânea, ou seja, o encontro dos jatos no centro do mancal. A injeção de água corrente foi feita através dos próprios anéis de alimentação dos mancais.

Após o teste, procedeu-se a limpeza dos mancais. Os solventes indicados para a limpeza são o tricloroetileno e o álcool-normal-propil.

3.3.3- Mancais Axiais

Os mancais axiais foram projetados e construídos visando principalmente a sua versatilidade de utilização. Para atingir tal objetivo, efetuou-se a alimentação dos mancais através de bujões intercambiáveis, que permitiram a variação dos diâmetros bem como o número de orifícios de alimentação com relativa facilidade. Foi possível portanto, obter diferentes geometrias para os mancais, com um número reduzido de componentes. Ver componente (C) da figura 3.1.

Na concepção destes conjuntos de mancais axiais visou-se obter um inter-relacionamento entre as seguintes variáveis:

- tipo de mancal (orifício central ou anular)
- alimentação com e sem rebaixo
- diâmetro do orifício de alimentação
- número de orifícios de alimentação

3.3.3.1- Mancal de orifício central

Os mancais de orifício central são constituídos de uma superfície plana e circular, tendo no centro um orifício de ali mentação, daí a sua denominação. Estes mancais normalmente utilizam alimentação com rebaixo.

O material utilizado na sua construção foi o bronze (70% CU, 10% SU, 20% Pb), devido a facilidade de usinagem e resistência à oxidação.

Um detalhe importante na construção deste mancal foi a dificuldade de se obter orifícios de alimentação usinados no próprio mancal. A solução adotada foi a utilização de bujões de ali mentação postiços e intercambiáveis. Nos mancais anulares esta solu ção foi valorizada devido a maior quantidade de orifícios existentes. Desta forma, ficou facilitada a construção do mancal pois as fura ções seriam feitas nos bujões.

Após a fixação dos bujões nos mancais, estes foram lapidados com a finalidade de reduzir os erros de forma utilizando os mesmos abrasivos usados nos mancais radiais. O lapidador utiliza do nesta operação é mostrado na figura 3.6 juntamente com o lapida dor dos mancais radiais.

A figura 3.7 mostra o esquema do mancal de orifi cio central e também a fixação do bujão de alimentação no mesmo. Os bujões foram feitos de latão e na montagem dos mesmos nos mancais foi utilizada vedação com Teflon. Na figura 3.8 encontra-se o man cal de orifício central utilizado nos ensaios.

Para garantir o paralelismo da superfície do man cal com a superfície oposta, foram previstos para a montagem do mancal no banco de ensaios três captadores capacitivos. A figura 3.7 mos tra o local onde foram colocados os captadores no mancal.

Fig. 3.7- Esquema do Mancal de Orifício Central

Fig. 3.8- Detalhe do Mancal de Orifício Central

3.3.3.2- Mancal anular

Os mancais anulares são utilizados sempre que for necessária a passagem de um eixo através deles. Estes mancais, como o nome esclarece, tem as superfícies com o formato de coroas circulares e a alimentação mais comum, é a efetuada através de um anel de orifícios. Os métodos de fabricação e os materiais utilizados foram os mesmos dos mancais de orifício central.

Para se obter diferentes configurações geométricas de mancais anulares, estes foram construídos com bujões de alimentação intercambiáveis, conforme pode ser visto na figura 3.9. Portanto, com um mesmo disco base para o mancal, foi possível variar sua geometria, simplesmente substituindo os bujões.

Nos mancais anulares, o diâmetro dos orifícios va
ria em função da quantidade, ou seja, se aumentamos o número de ori-
fícios o diâmetro dos mesmos diminui. Assim, para se obter configu-
rações com seis, oito ou doze orifícios foi necessário prever deze-
seis alojamentos no mancal, para a montagem dos bujões de alimenta-
ção.

Dessa forma, para o caso de um mancal com seis ori-
fícios de alimentação haveriam dez alojamentos preenchidos com bu-
jões cegos; para um mancal com oito orifícios, oito seriam obstruí-
dos e para o caso de doze orifícios, obstruir-se-iam quatro. A figu-
ra 3.10 mostra como foi feita esta distribuição de orifícios para
os mancais anulares.

Fig. 3.10- Distribuição dos Orifícios de Alimentação para os Manca-
is Anulares

A figura 3.11 mostra o detalhe de um dos mancais anulares e a figura 3.12 apresenta os bujões de alimentação utiliza dos nestes mancais.

Fig. 3.11- Detalhe do Mancal Anular

Fig. 3.12- Detalhes dos Bujões de Alimentação

3.3.3.3- Cálculos dos mancais axiais

Os mancais anulares e de orifício central foram calculados segundo Powell. O resumo destes cálculos encontra-se na tabela 3.2. Foram adotados, na medida do possível, os mesmos parâmetros da referência bibliográfica. Como exemplo tem-se: a folga axial, coeficiente de pressão.

CARACTERÍSTICAS DOS MANCAIS	ORIFÍCIO CENTRAL	ANULAR					
		1	2	3	4	5	6
Diâmetro externo - 2b(mm)	84,0	84,0			84,0		
Diâmetro interno - 2a(mm)	—	43,0			43,0		
Diâmetro do rebaixo - 2a(mm)	21,0	3,0			—		
Número de orifícios - n	1	6	8	12	6	8	12
Diâmetro dos orifícios - d(mm)	0,20	0,30	0,25	0,20	0,30	0,25	0,20
Consumo de ar total - M(m ³ /s)	2,8x10 ⁻⁵	5,5x10 ⁻⁴			5,5x10 ⁻⁴		
Folga axial - h(µm)	13,0	13,0			13,0		
Capacidade de carga - W(N)	534,0	534,0			374,0		
Pressão atmosférica - P _a (N/m ²)	10 ⁵						
Pressão de alimentação (P _o - P _a) (N/m ²)	4,14x10 ⁵						
Coeficiente de pressão - K _g	0,69						

OBS.: Mancais anulares 1, 2 e 3 (com rebaixo); 4, 5 e 6 (sem rebaixo)

Tab. 3.2- Resumo dos Cálculos dos Mancais Aerostáticos Axiais

3.4- Circuito Pneumático

O circuito pneumático do banco de ensaios constituiu-se basicamente de um compressor, filtros, reguladores de pressão, medidor de vazão e manômetros. Foram previstas para a alimentação do banco três tomadas de ar comprimido: a dos mancais axiais, mancais radiais e câmara de pressão, conforme pode ser visto na figura 3.13. As especificações dos componentes utilizados no circuito pneumático encontram-se na tabela 3.3.

COMPONENTE	ESPECIFICAÇÃO	TOMADA I	TOMADA II	TOMADA III
Regulador de Pressão com Manômetro	Fabricação	Norgreen	Schrader	Norgreen
	Referência	11-002-019	3563-2000	11-002-019
	Procedência	Inglaterra	U. S. A.	Inglaterra
	Escala de Pressão (lb/pol ²)	2 a 125	5 a 125	2 a 125
	Acuracidade (lb/pol ²) (N/m ²)	± 1,0 (± 7,0)	± 1,0 (± 7,0)	± 1,0 (± 7,0)
	Tubulação (pol.)	1/4(6,35mm)	1/4(6,35mm)	1/4(6,35mm)
Filtro	Fabricação	Norgreen	Schrader	Norgreen
	Referência	F44-200-MOTA	3533-1000	F44-200-MOTA
	Procedência	Inglaterra	U. S. A.	Inglaterra
	Capacidade nominal de filtragem (µm)	0,3	2,0	0,3
	Pressão Máxima (lb/pol ²) (N/m ²)	150 (10 ⁶)	150 (10 ⁶)	150 (10 ⁶)
	Tubulação (pol.)	1/4(6,35mm)	1/4(6,35mm)	1/4(6,35mm)

continua

COMPONENTE	ESPECIFICAÇÃO	conclusão		
		TOMADA I	TOMADA II	TOMADA III
Medidor de Vazão	Fabricação (pol.)	Fischer & Porter	—	—
	Referência	10A3565A	—	—
	Procedência	U. S. A.	—	—
	Vazão máxima (IGPM) (m ³ /s)	1,1 (8,5x10 ⁻⁴)	—	—
	Acuracidade (%)	±2	—	—
	Pressão máxima (lb/pol ²) (N/m ²)	400 (2,8x10 ⁶)	—	—
	Tubulação (pol.)	1/2(12,7mm)	—	—
Manômetro	Fabricação	Haenni	Haenni	Haenni
	Procedência	Suiça	Suiça	Suiça
	Fundo de escala(lb/pol ²) (N/m ²)	150 (10 ⁶)	150 (10 ⁶)	150 (10 ⁶)
Compressor	Fabricação		Nacional	
	Potência		5CV(3,7Kw)	
	Pressão máxima (lb/pol ²)		150(10 ⁶ N/m ²)	

Tab. 3.3- Especificações dos Componentes Utilizados no Circuito Pneumático

3.4.1- Utilização do Circuito Pneumático

Os mancais radiais, alimentados pela tomada II, ver figura 3.13, operam sempre com a mesma pressão de alimentação. Os mancais axiais e a câmara de pressão, tomadas I e III, operam com vá

rias pressões de alimentação, as quais são obtidas através dos reguladores de pressão. Assim, para cada pressão de alimentação utilizada nos mancais axiais, é possível variar a pressão de alimentação na câmara e conseqüentemente o carregamento nos mancais.

Fig. 3.13- Esquema do Circuito de Alimentação Pneumática do Banco de Ensaio

O ar comprimido utilizado tanto nos mancais axiais como nos radiais deve ser filtrado para a retenção de partículas com dimensões acima de $20\mu\text{m}$.

3.5- Equipamento de Medida

Na experimentação do banco de ensaios, foram feitos ensaios de mancais de orifício central e anulares, onde se procurou levantar as características de capacidade de carga e rigidez dos mancais em função da folga.

A medida da variação da folga no mancal foi efetuada através de um medidor de distância com uma amplitude de variação de $25\mu\text{m}$. O instrumento é composto de uma fonte de potência, oscilador, amplificador e voltímetro.

Para efetuar as leituras, instalaram-se os três capacitadores no mancal axial, próximos a superfície oposta do mesmo. A capacidade assim formada foi mostrada em termos de distância no painel do instrumento. As especificações do equipamento utilizado encontram-se na tabela 3.4.

MEDIDOR DE DISTÂNCIA	
fabricação	Wayne Kerr
referência	B 731B
frequência	10Hz a 10kHz
precisão	0,5% do fundo de escala
saídas	0-1mA (1000 Ω)
procedência	Inglaterra
CAPTADORES	
fabricação	Wayne Kerr
tipo	capacitivo
referência	MA1
distância máxima	$25\mu\text{m}$
acuracidade	$0,75\mu\text{m}$

Tab. 3.4- Especificações do Equipamento de Medida Utilizado

4- ENSAIOS E RESULTADOS

Com o banco de ensaios foram ensaiados oito mancais aerostáticos axiais com geometrias diferentes. Obtiveram-se as curvas de capacidade de carga em função da folga para várias pressões de alimentação. Foram obtidas também as curvas de rigidez dos mancais para a pressão de alimentação utilizada nos cálculos.

4.1- Descrição dos Ensaios

Durante os ensaios procurou-se obter as características de operação de vários mancais estudados para avaliá-las com os métodos de projeto existentes.

As características principais dos mancais ensaiados encontram-se na tabela 4.1.

TIPO DE MANCAL	ANULAR						ORIFÍCIO CENTRAL
Número do Mancal	1	2	3	4	5	6	7
Número de orifícios	6	8	12	6	8	12	1
Diâmetro do orifício (mm)	0,30	0,25	0,20	0,30	0,25	0,20	0,20
Rebaixo	C/R	C/R	C/R	S/R	S/R	S/R	C/R
Pressão de alimentação (N/m ²)	2,8x10 ⁵ -3,5x10 ⁵ -4,0x10 ⁵ -4,8x10 ⁵ -5,5x10 ⁵ -6,2x10 ⁵						
Pressão na câmara (N/m ²)	desde 2,0x10 ⁴ até 6,2x10 ⁵						
OBSERVAÇÃO:	C/R = com rebaixo			S/R = sem rebaixo			

Tab. 4.1 - Características Principais dos Mancais Ensaçados

Para cada um dos mancais ensaiados procedeu-se da maneira descrita a seguir:

a) fêz-se a limpeza do mancal e das superfícies de fixação do banco de ensaios com solventes e ar comprimido.

b) colocaram-se em funcionamento os mancais aerostáticos radiais, permitindo o movimento do eixo no sentido axial.

c) fixou-se o mancal no banco e este foi regulado através dos captadores e do medidor de distância.

d) fêz-se a alimentação do mancal com o primeiro parâmetro da pressão de alimentação (ver tabela 4.1).

e) carregou-se o mancal através da câmara de pressão; as pressões de carregamento variaram desde a correspondente a uma folga máxima de 25µm até a correspondente a uma folga nula.

f) para cada uma das pressões na câmara fizeram-se as leituras das folgas correspondentes.

g) todas as leituras de pressão foram feitas nos respectivos manômetros; a medida da folga foi feita através do medidor de distância e captadores; a vazão foi lida no medidor de vazão.

h) repetiu-se tudo novamente, a partir do item (d) para os demais parâmetros da pressão de alimentação.

Todos os ensaios foram efetuados da mesma forma e no mesmo ambiente. A temperatura durante os ensaios variou na faixa de 22 a 24°C com uma unidade média do ar de 41%.

4.2- Resultados Obtidos

Com os resultados obtidos dos ensaios, construíram-se as curvas de capacidade de carga em função da folga, para cada um dos mancais ensaiados. Estes gráficos, encontram-se nas figuras 4.1 até figura 4.7. Os mancais foram numerados conforme a tabela 4.1.

Fig. 4.1- Capacidade Carga x Folga para o mancal nº1 (C/R, $n = 6$)

Fig. 4.2- Capacidade de Carga x Folga para o Mancal nº 2
 (C/R, $n = 8$)

Fig. 4.3- Capacidade de Carga x Folga para o Mancal nº 3
 [C/R, $n = 12$]

Fig. 4.4- Capacidade de Carga x Folga para o Mancal n° 4
(S/R, $n = 6$)

Fig. 4.5- Capacidade de Carga x Folga para o Mancal nº 5
 (S/R, $n = 8$)

Fig. 4.6- Capacidade de Carga x Folga para o Mancal nº 6
 (S/R, $n = 12$)

Fig. 4.7- Capacidade de Carga x Folga para o Mancais nº 7 (S/R, $n = 1$)

A partir das curvas de capacidade de carga em função da folga dos mancais ensaiados, obtiveram-se as curvas de rigidez destes mancais, para a pressão de alimentação utilizada nos cálculos dos mesmos, ou seja, $(P_o - P_a) = 4,14 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Estas curvas são mostradas nas figuras 4.8 a 4.11.

Fig. 4.8- Rigidez Axial dos Mancais nº1 (C/R, $n=6$) e nº4 (S/R, $n=6$)

Fig. 4.9- Rigidez Axial dos Mancais $n^{\circ}2$ (C/R, $n=8$) e $n^{\circ}5$ (S/R, $n=8$)

Fig. 4.10- Rigidez Axial dos Mancais n° 3 (C/R, $n = 12$) e n° 6 (S/R, $n = 12$)

Fig. 4.11- Rigidez Axial do Mancal nº 7 (C/R, $n = 1$)

4.3- Análise dos Resultados

Procurou-se analisar os resultados obtidos com os calculados, fazendo a comparação entre os valores da capacidade de carga e rigidez dos mancais com os seus respectivos valores teóricos. Os resultados desta análise são mostrados na tabela 4.2, onde os valores da capacidade de carga W foram obtidos das figuras 4.1 a 4.7 e os valores da rigidez e da folga h foram retirados das figuras 4.8 a 4.11.

MANCAL	VALORES CALCULADOS			VALORES OBTIDOS		
	$h(\mu m)$	$W(N)$	$K(N/m)$	$W(N)$	$K(N/m)$	$h(\mu m)$
nº 1 C/R, $n=6$	13,0	534	58×10^6	355	31×10^6	16,0
nº 2 C/R, $n=8$	13,0	534	58×10^6	238	36×10^6	9,0
nº 3 C/R, $n=12$	13,0	534	58×10^6	430	50×10^6	13,5
nº 4 S/R, $n=5$	13,0	374	40×10^6	178	17×10^6	12,5
nº 5 S/R, $n=8$	13,0	374	40×10^6	128	21×10^6	7,5
nº 6 S/R, $n=12$	13,0	374	40×10^6	200	31×10^6	9,5
nº 7 C/R, $n=1$	13,0	534	58×10^6	330	44×10^6	15

Tab. 4.2- Quadro Comparativo entre os Valores Calculados e os Resultados Obtidos

Na análise dos resultados da tabela 4.2 nota-se, que de um modo geral, os valores obtidos foram menores do que os cálculados. Dentre os possíveis fatores que influenciaram a obtenção de ses resultados pode-se comentar os seguintes:

a) Tanto as superfícies dos mancais como a superfície do disco de fixação foram lapidadas. Antes da montagem dos mancais no banco, a superfície de fixação foi rigorosamente alinhada com a superfície oposta do mancal, ou seja, a cabeça do eixo. Porém, a superfície de fixação não recebeu nenhum tratamento contra oxidação e esta tornou-se inevitável, apesar dos cuidados dispensados. Devido a este fato, os mancais estudados provavelmente apresentaram erros de paralelismo entre as superfícies além dos limites tolerados, permitindo uma vazão de ar desequilibrada entre as suas superfícies.

b) Nos cálculos teóricos obtiveram-se valores para os orifícios de alimentação dos mancais, os quais foram aproximados para os valores dos diâmetros das brocas existentes. Assim, o diâmetro de 0,297mm foi aproximado para 0,30mm; 0,254 para 0,25mm e 0,221 para 0,20mm. Se se levarem em conta estas aproximações, como também o número de orifícios dos mancais, a diferença destas aproximações deverá ser multiplicada por 6, 8 e 12 respectivamente. Portanto, o motivo pelo qual os picos de rigidez se deslocaram em relação a folga de projeto ($h = 13\mu\text{m}$), pode ser uma decorrência destas aproximações feitas. Ver figuras 4.8 a 4.11 e tabela 4.1.

As sugestões a serem feitas para o aumento da capacidade de carga e rigidez dos mancais ensaiados, estão diretamente ligadas aos comentários feitos. Somando-se tais problemas, com certeza, serão conseguidos melhores resultados.

Por outro lado, pode-se notar, através das figuras 4.1 até 4.11, a influência dos rebaixos nos mancais, que proporcionam a eles, rigidez e capacidade de carga maiores. Nos mancais ensaiados, obteve-se para os mancais com rebaixo, rigidez e capacidade

de carga cêrca de 50% maiores que para os mancais sem rebaixo. Os valores teóricos da diferença entre a rigidez e capacidade de carga para mancais com e sem rebaixo é de 30%.

5- CONCLUSÕES

Foram analisados os vários tipos de mancais a gás e a necessidade do desenvolvimento deste campo da tecnologia, bem como as vantagens de se construir um banco de ensaios para mancais aerostáticos.

Portanto, procurou-se, neste trabalho, apresentar a tecnologia adquirida no projeto e construção de um banco de ensaios para mancais aerostáticos axiais, através do qual pudessem ser avaliados alguns parâmetros destes mancais.

Na concepção do banco de ensaios fizeram-se adaptações convenientes que permitiram ensaiar mancais axiais anulares e de orifício central.

Fizeram-se os ensaios de vários mancais axiais e obtiveram-se as características de rigidez e capacidade de carga para diferentes pressões de alimentação. Compararam-se os resultados obtidos com os teóricos e propuseram-se sugestões para a melhoria dos valores obtidos.

Apesar de se efetuarem somente os ensaios estáticos dos mancais axiais, pode-se adaptar o banco de ensaios para experimentos com o eixo em rotação. Além disto outros estudos de mancais a gás podem ser desenvolvidos no banco de ensaios. Portanto, enumeraram-se a seguir os experimentos que podem ser efetuados no banco de ensaios.

a) Estudo do amortecimento da película de ar entre as superfícies dos mancais axiais e a influência das dimensões e formas dos rebaixos neste amortecimento. Instabilidade dos mancais axiais devido aos rebaixos .

b) Estudo da distribuição de orifícios de diferentes diâmetros ao longo do anel de orifícios de

alimentação dos mancais anulares. Influência destes orifícios na rigidez do mancal.

c) Estudo de mancais de película comprimida com geometria circular. Avaliação da rigidez e capacidade de carga.

d) Estudo dos mancais axiais com alimentação através de ranhuras. Comparação com a alimentação através de orifícios.

6- BIBLIOGRAFIA

GRASSAN, N. S. & POWELL, J. W. - *Gas lubricated bearings*. London, Butterworths, 1964. 309p.

GROSS, W. A. - *Gas film lubrication*. New York, John Wiley and Sons, 1962. 413p.

HARRISON, W. J. - The hydrodynamical theory of lubrication with special reference to air as a lubricant. *Trans. Camb. phil. Soc.*, 22(3):39-54, may. 1913.

KINGSBURY, A. - Experiments with an air - lubricated journal. *J. Amer. Soc. nav. Engrs.*, 9:267-292, 1897.

MUNDAY, A. J. - Gas bearings. In: NEALE, M. J., Ed. — *Tribology handbook*. London, Butterworths, 1973. Part. A 10.

POWELL, J. W. - *Design of aerostatic bearings*. London, The Machinery Publishing, 1970. 280p.

PURQUERIO, B. M. & LIRANI, J. & RUFFINO, R. T. - *Manuais lubrificados a gás para a indústria e pesquisa*. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 1973. 11p. (Trab. apresentado no I Simpósio Brasileiro de Ciências Mecânicas e II Symposium Nacional de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro).

WILLIS, R. - On the pressure produced on a flat plate when opposed to a stream of air issuing from an orifice in a plane surface. *Trans. Camb. phil. Soc.*, 3:129-141, apr. 1828.

7- ANEXOS

7.1- Glossário

Folga - Espaço ou distância entre a superfície do mancal e a superfície oposta. A folga também constitui uma resistência pneumática entre o orifício de alimentação (ou o rebaixo) e a saída do ar do mancal.

Mancal Aerodinâmico - Mancal a gás cuja pressão na película de gás é gerada devido a viscosidade do fluido e através do efeito de cunha. É também conhecido por mancal auto atuante.

Mancal Aerostático - Mancal a gás cuja pressão na película de gás é mantida por uma fonte de alimentação externa. É também chamado de mancal pressurizado externamente.

Mancal Aerostático Axial - Mancal aerostático cujas superfícies são planas e circulares. Estes mancais podem ter a alimentação central ou anular.

Mancal Aerostático Radial - Mancal aerostático cujas superfícies são cilíndricas.

Mancal Anular - Mancal aerostático axial cuja alimentação é feita através de orifícios ou ranhuras distribuídos circunferencialmente em sua superfície.

Mancal a Gás - Um mancal lubrificado a gás pode ser definido como sendo duas superfícies usinadas com precisão separadas por uma fina película de gás e dispostas de tal maneira que permitem o movimento relativo entre elas. Qualquer tendência no sentido de modificar a folga entre as superfícies é compensada por uma mudança da pressão na película de gás. Embora outros gases possam ser

utilizados nos mancais a gás, o ar é o lubrificante mais comumente usado.

Mancal de Orifício Central - Mancal aerostático axial cuja alimentação é feita através de um orifício no centro da superfície do mancal.

Mancal de Película Comprimida - Mancal a gás cuja pressão da película de gás provém do movimento vibratório entre as superfícies do mancal. O movimento vibratório é normal às superfícies do mancal e gerado por uma fonte externa.

Rebaixo ou Recesso - Porção rebaixada na superfície do mancal onde penetra o ar sob pressão.

Restritor - Resistência pneumática entre a fonte de alimentação externa a pressão constante e a folga ou o rebaixo do mancal.

Superfície do Mancal - Superfície onde se encontram os orifícios de alimentação e os rebaiços do mancal. Pode ser fixa ou móvel.

Superfície Oposta - Superfície em contraposição à superfície do mancal que, juntas permitem o movimento relativo. Se a superfície do mancal é fixa, a superfície oposta será móvel e vice e versa. Nos mancais aerostáticos radiais, as superfícies opostas são constituídas pelos eixos.

7.2- Desenhos do Banco de Ensaios

- 03 -

Fig. 7.1- Desenho de Conjunto do Banco de Ensaios

Fig. 7.2- Desenho do Eixo

Fig. 7.3- Desenho dos Mancais Radiais

Fig. 7.4- Desenho do Mancal Anular

Fig. 7.5- Desenho do Mancal de Orifício Central