



COBENGE 2005

XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia

"Promovendo e valorizando a engenharia em um cenário de constantes mudanças"

12 a 15 de setembro - Campina Grande Pb

Promoção/Organização: ABENGE/UFPG-UFPE

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA A SELEÇÃO DE MANCAIS DE FILME DE FLUIDO AEROSTÁTICOS APLICADA A DISCIPLINA CONSTRUÇÃO DE MÁQUINAS

Prof. Dr. Luiz Antonio Pinheiro Balestrero - Balestrero @ mackenzie.com.br
Universidade Presbiteriana Mackenzie - Departamento de Engenharia Mecânica
Rua da Consolação 896, prédio 6, Campus Itambé
CEP 01302 - 907 - São Paulo - São Paulo

***Resumo:** Um dos principais enfoques da disciplina construção de máquinas é dado ao projeto de mancais, sendo os mesmos apreciados pelos institutos de pesquisa e graduação das universidades. Na busca de melhorias no ensino - aprendizagem procurou-se desenvolver uma metodologia para a seleção dos mancais de filme de fluido aerostáticos utilizados em eixos árvores de máquinas ferramentas, condizente ao conteúdo desejado. Além disso, é feita também uma síntese teórica do cálculo da rigidez em eixos árvores de máquinas ferramentas.*

***Palavras - chaves:** Mancais aerostáticos, Eixos - árvores, Máquinas ferramentas, Rigidez, Aprendizagem.*

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente necessidade de alta precisão, estabilidade e elevadas rotações de trabalho, os mancais de filme de fluido lubrificado a ar (mancais aerostáticos) tem-se destacado nas aplicações em máquinas ferramentas e equipamentos de precisão. Os mancais aerostáticos, quando aplicados as máquinas ferramentas, podem proporcionar, além da alta rigidez, uma elevada precisão de movimento. Relativamente às suas vantagens, são indiferentes à variação de temperatura, apresentam nível elevado de amortecimento, operam em altas velocidades, possuem desgaste nulo, suportam cargas radiais, axiais e combinadas, e apresentam normalmente as formas de construção cilíndricas, planas circulares e anulares. Em vista disso, cabeçotes equipados com mancais aerostáticos são normalmente utilizados como componentes indispensáveis para máquinas ferramentas de precisão ou máquinas especiais.

A disciplina Construção de Máquinas ministrada no 5º semestre do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Presbiteriana Mackenzie, tem a preocupação de ensinar aos alunos a desenvolverem projetos embasados em teorias sólidas, enfatizando a importância do alcance dos resultados obtidos. Visando a aplicabilidade do conteúdo da disciplina e do ensino aprendizagem, idealizou-se uma metodologia para a seleção dos mancais aerostáticos aplicados a eixos árvores de máquinas ferramentas de precisão, objetivo do presente trabalho. Uma síntese do método de cálculo da rigidez no nariz do eixo árvore também fazem parte do contexto deste trabalho.

2. RIGIDEZ DE EIXOS ÁRVORES COM MANCAIS AEROSTÁTICOS

Para o equacionamento que se segue, foi considerado o eixo árvore como uma viga apoiada em dois suportes (mancais) separados por uma distância **b**, tendo uma parte em balanço à uma distância **a** do suporte frontal (Figura 1). A força **F**, aplicada na extremidade da parte em balanço da viga, deflete tanto a viga como os mancais.

Considerando a definição de rigidez,

$$\frac{1}{R} = \frac{d\delta}{dF} \quad (1)$$

segundo SHUZZI (1981) e BRANDON & AL SHAREEF (1992) é possível escrever a rigidez no nariz do eixo árvore, ou seja:

$$\frac{1}{R} = \frac{a^3}{3 E I_a} + \frac{b a^2}{3 E I} + \frac{1}{K_1} \left(1 + \frac{a}{b}\right)^2 + \frac{1}{K_2} \left(\frac{a}{b}\right)^2 \quad (2)$$

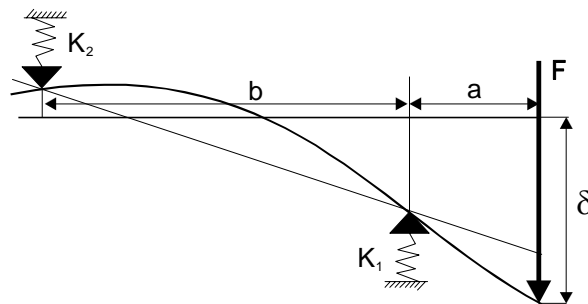


Figura 1 - Deflexão de uma viga montada em suportes flexíveis.

onde, **a** é o comprimento da viga em balanço, **b** o comprimento entre mancais, **E** o módulo de elasticidade, **I_a** e **I** os momentos de inércia da parte em balanço e entre mancais, **K₁** e **K₂**, a rigidez do mancal frontal e traseiro, respectivamente. O primeiro termo da equação 2 representa a deflexão da parte em balanço para seu nariz, o segundo termo representa o deslocamento no nariz do eixo árvore produzido pela deflexão de uma simples viga suportada por dois mancais, o terceiro e o quarto são deslocamentos para o nariz do eixo árvore produzidos pela deflexão dos mancais frontal e traseiro respectivamente. Esses quatro deslocamentos são todos na mesma direção.

3. DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRATÉGIA PARA A SELEÇÃO DE MANCAIS AEROSTÁTICOS

A Figura 2 ilustra segundo BALESTRERO (1997) os fatores que influenciam no comportamento do sistema mancal aerostático - eixo árvore e o inter-relacionamento entre eles. Observando-se a Figura 2 nota-se, que os mancais aerostáticos com a respectiva configuração, são selecionados em ordem crescente, obedecendo requisitos como custo, rigidez, facilidade de fabricação e tamanho normal (parte superior da Figura 2). Os mancais

com orifícios de alimentação (Figura 2) apresentam um baixo custo de fabricação, possuem uma baixa rigidez comparativa com os demais, apresentam uma alta facilidade de fabricação só perdendo para os mancais aerodinâmicos e apresentam um tamanho normal razoável (porte médio). Já os mancais ranhurados possuem um custo de fabricação mais alto que os mancais de orifícios, uma alta rigidez só perdendo para os mancais com restritores flexíveis, possuem a menor facilidade de fabricação comparativamente com os demais e apresentam um pequeno tamanho normal. Os mancais porosos por sua vez, apresentam um maior custo de fabricação que os mancais de orifícios e ranhuras, possuem uma rigidez média, uma baixa facilidade de fabricação e um grande porte (tamanho normal). Já os mancais com restritores flexíveis apresentam o maior custo de fabricação, rigidez e tamanho normal comparativamente com os demais e possuem uma média facilidade de fabricação. Os mancais aerodinâmicos por sua vez, possuem os menores custos de fabricação, rigidez e tamanho normal e apresentam a maior facilidade de fabricação comparativamente com os demais. Os mancais aerostáticos são aplicados aos eixos árvores (parte central da Figura 2) considerando-se, os parâmetros que influenciam no comportamento estático do sistema eixo árvore - mancal aerostático, isto é, rigidez total no nariz do eixo árvore, metodologia de cálculo, disposição dos mancais (rigidez do par), rotação, deflexão no nariz da árvore e geometria. Desta forma, segundo BALESTRERO (1997) o inter-relacionamento entre os parâmetros que fazem parte do sistema mancal aerostático - eixo árvore (parte inferior da Figura 2 da esquerda para a direita) é realizado a saber:

- rigidez total no nariz da árvore em função da disposição dos mancais aerostáticos utilizados;
- rigidez total no nariz da árvore em função de sua geometria;
- rigidez total no nariz da árvore em função tamanho normal do mancal aerostático utilizado;
- rigidez total no nariz da árvore em função facilidade de fabricação do mancal aerostático utilizado;
- rigidez total no nariz da árvore em função da rigidez do mancal aerostático utilizado;
- rigidez total no nariz da árvore em função do custo de fabricação do mancal aerostático utilizado;
- rigidez do mancal aerostático em função de seu tamanho normal;
- rigidez do mancal aerostático em função de sua facilidade de fabricação;
- rigidez do mancal aerostático em função de seu custo de fabricação;
- deflexão no nariz da árvore em função de sua geometria;
- rigidez total no nariz da árvore em função de sua rotação;
- rigidez total no nariz em função da metodologia de cálculo utilizada.

Segundo BALESTRERO (1997), com o inter-relacionamento entre os parâmetros discutidos acima, espera-se estar contribuindo no sentido de se extrair o maior número de informações, para a otimização do projeto dos eixos árvores para máquinas ferramentas de precisão equipados com mancais aerostáticos, despertando dessa forma, o interesse do aluno e aumentando seu conhecimento no que tange ao projeto, seleção, custo e fabricação dos elementos de máquinas, particularmente seus mancais. A acuracidade de uma peça obra produzida por uma máquina ferramenta de precisão é determinada pela rigidez no nariz do eixo árvore. Desta forma uma considerável redução nas deflexões no nariz do eixo árvore pode ser conseguida através de uma correta seleção dos parâmetros geométricos do eixo árvore e do mancal aerostático utilizado.

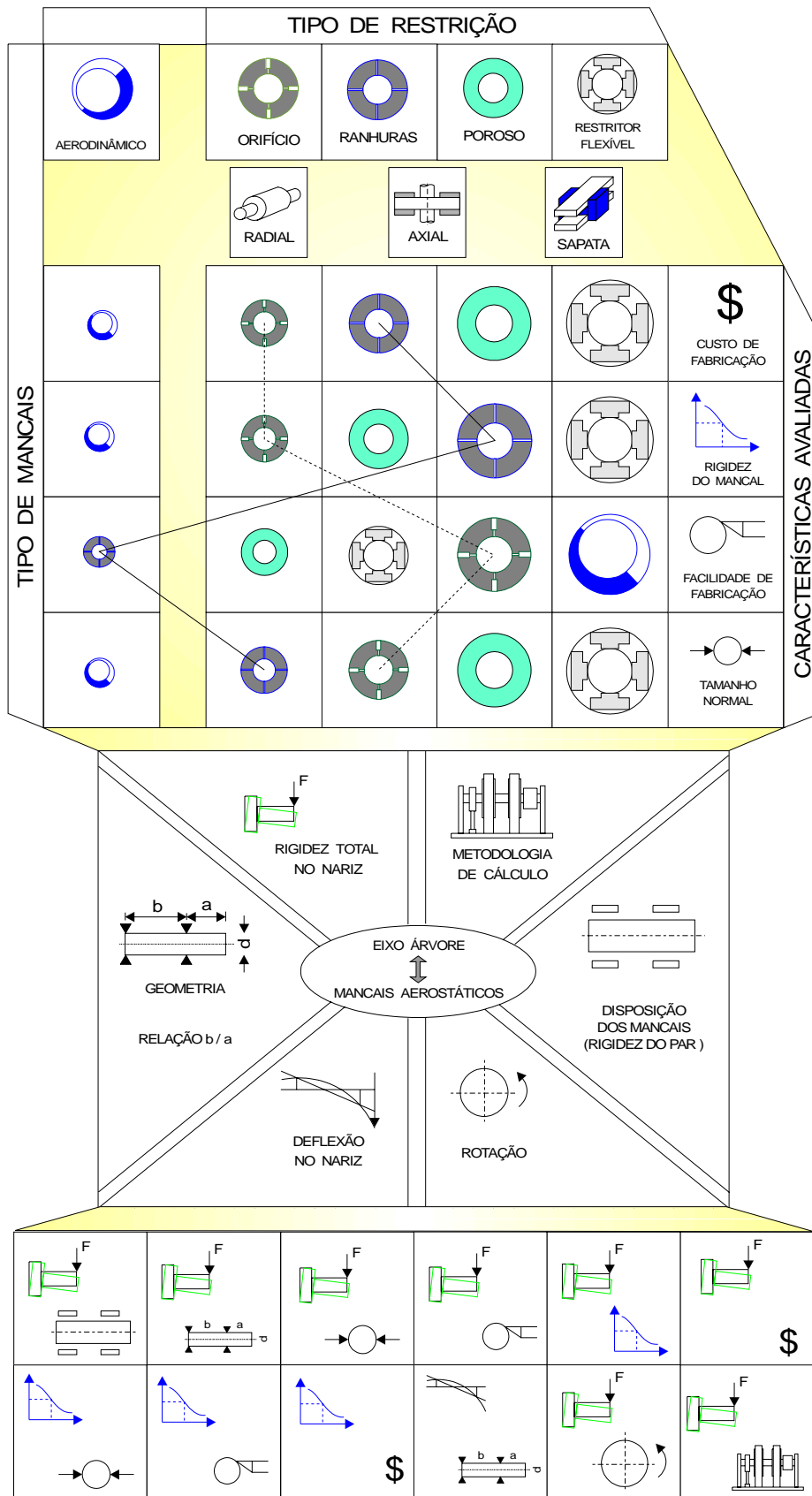


Figura 2 - Inter-relacionamento dos fatores que influenciam o sistema mancal - eixo árvore.

O primeiro passo da estratégia consiste na escolha de uma configuração apropriada para os mancais aerostáticos radiais (parte superior da Figura 2). A Tabela 1 ilustra os fatores operacionais que auxiliam na escolha da configuração apropriada para os mancais aerostáticos radiais.

Tabela 1 - Comparação das configurações de mancais aerostáticos.

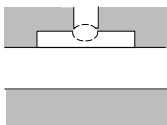
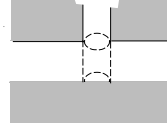
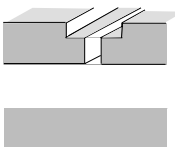
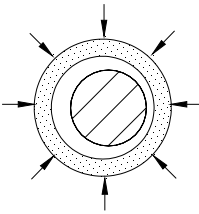
Configuração	Radial Cilíndrico	Yates	Radial Cônico	Esférico
Fatores Operacionais				
Capacidade de carga na direção axial	*	****	***	***
Capacidade de carga na direção radial	****	***	**	**
Acuracidade de posicionamento na direção axial	*	***	****	****
Acuracidade de posicionamento na direção angular	*	****	****	***
Acuracidade de posicionamento na direção radial	***	**	****	****
Rigidez na direção radial	****	***	**	**
Rigidez na direção axial	*	****	***	**
Custos de produção	****	***	*	*
Facilidade de projeto	****	***	***	**
facilidade de fabricação	****	***	***	*
Facilidade de manutenção	****	***	**	**
Capacidade de alinhamento próprio	*	*	****	**
capacidade de suportar cargas combinadas radiais e axiais	*	****	***	**
economia de vazão, potência e número de partes do mancal	*	***	****	***
capacidade de suportar vibração externa	**	****	**	**
dimensão externa para ajuste do diâmetro do eixo	****	***	**	**
amortecimento e estabilidade	**	****	***	***

**** excelente *** bom ** normal * pobre

Observando a Tabela 1 nota-se, que em eixos árvores de retificadoras onde os esforços axiais são mínimos, a configuração de mancal mais indicada é o radial cilíndrico, o qual atuando em conjunto com mancais axiais, oferece maior rigidez e capacidade de carga axial e radial do que a configuração de Yates.

O próximo passo consiste na seleção do restritor de alimentação. Os principais fatores que afetam a escolha do restritor de alimentação a ser utilizado em um mancal aerostático são a rigidez, a precisão de fabricação, as dimensões externas, o efeito na estabilidade do mancal e o custo de fabricação. A Tabela 2 ilustra as características dos restritores mais utilizados nos mancais aerostáticos.

Tabela 2 - comparação dos restritores mais utilizados no projeto dos mancais aerostáticos.

Tipo de Restritor	Vantagens	Desvantagens
<p data-bbox="231 750 518 784">Orifício com rebaixo</p> 	<ul data-bbox="582 716 933 862" style="list-style-type: none"> • Esta é a geometria mais comum e proporciona maior rigidez 	<ul data-bbox="981 716 1340 929" style="list-style-type: none"> • Pode propiciar instabilidade aerostática conhecida como martelo pneumático. • Fabricação mais difícil.
<p data-bbox="231 1008 518 1041">Orifício sem rebaixo</p> 	<ul data-bbox="582 1008 949 1153" style="list-style-type: none"> • Mais simples forma de construção do mancal e não ocorre o martelo pneumático. 	<ul data-bbox="981 1008 1340 1187" style="list-style-type: none"> • A capacidade de carga e rigidez são 33% menor que os mancais de orifícios com rebaixo.
<p data-bbox="311 1254 438 1288">Ranhura</p> 	<ul data-bbox="582 1254 949 1657" style="list-style-type: none"> • Mancais com este tipo de restritor podem apresentar baixas relações L/D e pequeno tamanho. • Evita as perdas relativas a dispersão do gás associada ao projeto dos orifícios. • Livre do martelo pneumático. 	<ul data-bbox="981 1254 1340 1467" style="list-style-type: none"> • As ranhuras apresentam maior dificuldade de fabricação e estão sujeitas ao entupimento.
<p data-bbox="319 1702 430 1736">Poroso</p> 	<ul data-bbox="582 1702 941 1960" style="list-style-type: none"> • Devido a maior distribuição de ar na alimentação, pode proporcionar alta capacidade de carga. • construção (estrutura) simples. 	<ul data-bbox="981 1702 1348 2027" style="list-style-type: none"> • Largas folgas. • Permeabilidade imprevisível. • As características de queda de pressão é uma complexa função das dimensões do mancal e propriedades do fluido.

Segundo CHENG & ROWE (1995), na prática a seleção do tipo do restritor é realizada em paralelo com a configuração do mancal, devida a ambos apresentarem a mesma importância no desempenho operacional do mancal.

Desta forma, a metodologia de projeto a ser utilizada no cálculo dos valores da rigidez no nariz de um eixo árvore, como o ilustrado na Figura 1, para uma determinada relação b/a deve apresentar os seguintes passos:

1. seleção de uma configuração apropriada para os mancais aerostáticos radiais utilizados (Tabela 1);
2. seleção do restritor de alimentação (Tabela 2);
3. cálculo das dimensões do restritor, capacidade de carga e rigidez do mancal proposto por BALESTRERO (1997);
4. cálculo da flexibilidade no nariz da árvore $1/R_1$ devido à deformação dos mancais (3º e 4º termo da equação 2);
5. cálculo da flexibilidade no nariz da árvore $1/R_2$ devido à deflexão da própria árvore (1º e 2º termo da equação 2);
6. cálculo da rigidez total no nariz da árvore (equação 2);

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos que visam a seleção e o projeto dos mancais, sempre foram vistos com bons olhos pelos institutos de pesquisa e graduação das universidades, sendo um dos principais enfoques da disciplina construção de máquinas, disciplina ministrada em diversos cursos de engenharia em todo o país.

O projeto de mancais de precisão é reconhecido pelo meio industrial de hoje como uma necessidade prioritária. Porém, uma das maiores dificuldades tribológicas tem sido, que o projeto de mancais não era anteriormente reconhecido como um item carente de cuidados especiais. O mancal é, apesar de tudo, uma diminuta parte na maioria das máquinas e, por isso, um decepcionantemente simples componente. Existem muito poucos produtos na moderna tecnologia que sejam mais simples em forma que uma bucha circundando um eixo, os quais constituem um mancal radial comum, apesar do projeto e fabricação desses elementos serem resguardados por uma vasta experiência e conhecimentos científicos e tecnológicos.

A imensa simplicidade dos mancais, resultou na negligência dos mesmos, e um dos principais requisitos hodiernos é prover os projetistas de máquinas, engenheiros e estudantes de engenharia com a mais completa apreciação das características de operação e projeto dos mancais, objetivo fundamental dos centros de pesquisa que reconhecem a importância da análise dos aspectos tribológicos no projeto de máquinas. Assim, justifica-se a qualquer tempo a investigação, seja ela teórica ou experimental, de novas tecnologias que visem a melhoria da qualidade dos projetos de máquinas através da otimização do projeto de seus elementos constituintes - particularmente seus mancais.

Esta metodologia didática desenvolvida no presente trabalho pode contribuir, para o interesse do aluno no tópico apresentado, aumentando seu conhecimento no que tange ao projeto e seleção dos mancais dos elementos de máquinas, levando em consideração aspectos como custo e fabricação, abrindo sua visão e contribuindo para a sua inclusão no mercado de trabalho.

5. REFERÊNCIAS

BALESTRERO, L. A. P. Uma avaliação de mancais aerostáticos para máquinas ferramentas:

Estudo e dimensionamento de eixos árvores. São Carlos, Julho de 1997. 208p. (Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo).

BRANDON, J. A. & AL - SHAREEF, K. J. H. Optimization strategies for machine tool spindle - bearing systems : A critical review. *Journal of engineering for industry, transactions of the ASME*, vol. 114, pp. 244 - 253. May 1992.

CHENG, K. & ROWE, W. B. A selection strategy for the design of externally pressurized journal bearings. *Tribology International*, vol.28, n7, pp. 465 - 474, 1995.

HAHN, W. Das hydrostatische Spindellager bei schiefer Verlagerung. *Werkzeugmaschine International*, vol. 3, pp. 9 -14, jun. 1974.

HAN, D. C. ; PARK, S. S. ; KIM, W. J. ; KIM, J. W. A study on the characteristics of externally pressurized air bearings. *Precision engineering*, vol. 16, n3, pp. 164 - 173, july 1994.

POWELL, J. W. *Design of aerostatic bearings*. London, The machinery publishing, 280p, 1970.

ROWE, W. B. ; CHENG, K. ; IVES, D. A knowledge - based system for the selection of fluid film journal bearings. *Tribology international*, vol. 24, n5, pp. 291 - 297, oct. 1991.

SHUZZI, Y. A Study of Static Stiffness of Machine Tool Spindles, *Int. J. Mach. Toll Des Res.* , vol. 21, n1, pp. 23 - 40, 1981.

SLOCUM, A. H. *Precision machine design*. Englewood Cliffis : Prentice Hall, 750, 1992.
WECK, M. ; BISPINK, T. ; BOTTGER, U. ; LUDERICH, J. *High precision spindle technology*. Fraunhofer-Institut Fur Produktionstechnologie (IPT), AACHEN, Germany, 1991. 100p.

DEVELOPMENT OF AEROSTATIC FLUID FILM BEARINGS SELECTION METHODOLOGY APPLIED TO DISCIPLINE DESIGN OF MACHINE ELEMENTS

Abstract: *One of the principal theme of discipline design of machine elements is given in the bearings design, the same being appreciated by research and development institutes of universities. In quest of betterment in education - apprenticeship, this paper tries to develop of aerostatic fluid film bearings selection methodology, applied in machine tools spindle to the desired contents. A theoric syntese of stiffness machine tools spindles is presented.*

Key - words: Aerostatic bearings, Spindles, Machine tools, Stiffness, Apprenticeship.

