

UMA PROPOSTA DE PROJETO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE MANCAIS DE FILME DE FLUIDO AEROSTÁTICOS APLICADOS NA DISCIPLINA CONSTRUÇÃO DE MÁQUINAS

Prof. Dr. Luiz Antonio Pinheiro Balestrero - Balestrero @ mackenzie.com.br
Prof. Ms. Carlos Oscar Correa de Almeida Filho – cocaf @ 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 com o objetivo de motivar os alunos de Engenharia Mecânica, procurou-se desenvolver uma metodologia para o cálculo e análise experimental 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 proposta para o cálculo e análise experimental comparativa dos mancais aerostáticos aplicados a eixos árvores de máquinas ferramentas de precisão, visando a motivação dos alunos de Engenharia Mecânica com o futuro desenvolvimento de

experiências no laboratório de máquinas ferramentas. Uma síntese do desempenho teórico dos mancais aerostáticos com orifícios de alimentação e um 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, conforme ilustra a 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 equação de rigidez na extremidade do eixo árvore, ou seja:

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

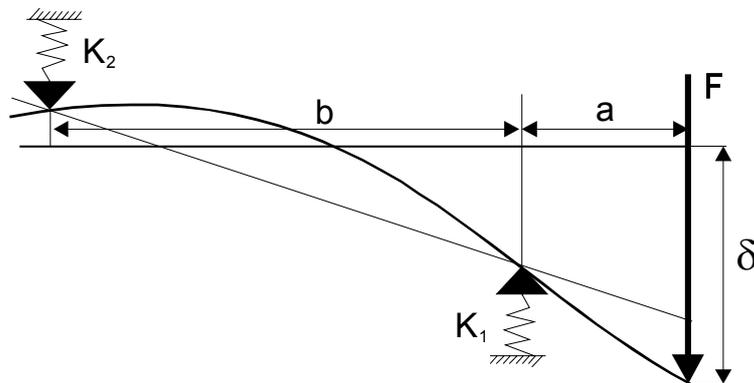


Figura 1 - Deflexão de uma viga montada em suportes flexíveis.
(SHUZZI, 1981)

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 refere-se ao deslocamento da extremidade em balanço submetida à força **F**. O segundo termo representa a deflexão da mesma extremidade resultante da deflexão de uma viga bi apoiada em mancais, o terceiro e o quarto termo são deslocamentos para a extremidade do eixo produzidos pela deflexão dos mancais frontal e traseiro respectivamente. O deslocamento **δ** na extremidade em balanço é a somatória dos quatro deslocamentos citados.

3 MANCAIS AEROSTÁTICOS

Os mancais aerostáticos utilizados em eixos árvores de máquinas ferramentas apresentam quatro mecanismos básicos de lubrificação: aerodinâmico, película comprimida, aerostático e híbrido, conforme ilustra a Figura 2 [ROWE et al., 1991].

Os mancais aerodinâmicos, também denominados de auto-atuantes, geram a sua própria pressão de sustentação no filme lubrificante através do mecanismo de velocidade induzida e cisalhamento viscoso no filme convergente. Nesses mancais, as pressões geradas no filme lubrificante são relativamente baixas. A vantagem oferecida por esses mancais é a sua independência de qualquer fonte externa de alimentação de fluido para o seu funcionamento. A desvantagem ocorre no início do movimento devido a baixa pressão, possibilitando o contato metálico entre o eixo e a bucha do mancal.

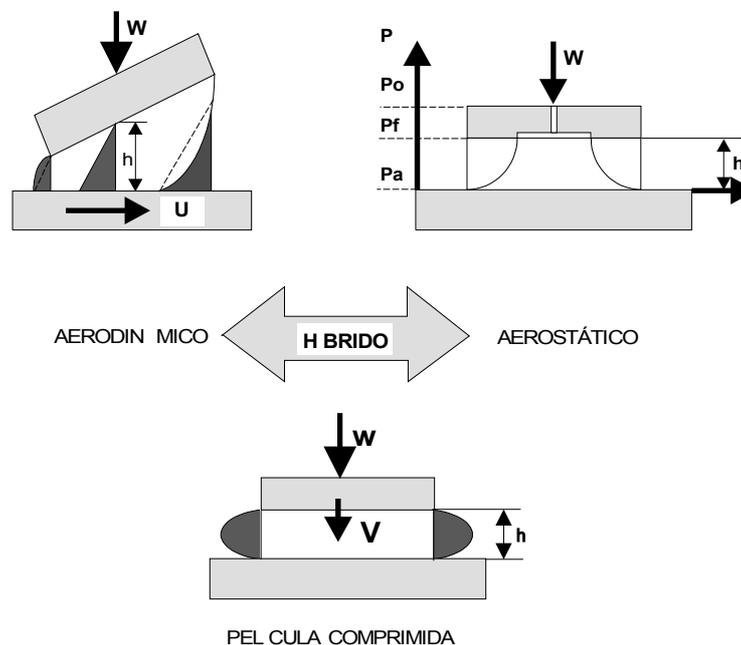


Figura 2 – Tipos básicos de mancais aerostáticos para eixos árvores.
(ROWE et al., 1991)

Os mancais de película comprimida encontram aplicações somente em laboratório, não encontrando utilizações práticas gerais em problemas de engenharia.

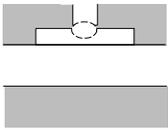
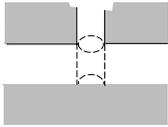
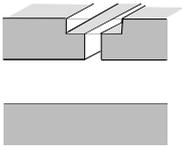
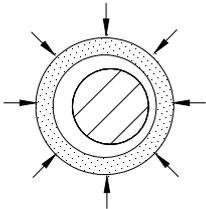
Já o mancal híbrido, combina as soluções aerostáticas e aerodinâmicas para a sustentação da carga. O componente aerostático pode aumentar substancialmente devido aos efeitos do escoamento induzido pelo aumento da velocidade.

Os mancais aerostáticos também são classificados quanto à sua função e geometria. Os mancais radiais suportam cargas na direção radial do eixo e apresentam normalmente a forma cilíndrica. Possuem uma ou duas fileiras circunferenciais de entrada de fluido, posicionadas no meio do comprimento do mancal ($l/L=0,5$) ou à um quarto do comprimento do mancal ($l/L=0,25$), sendo que esta última proporciona maior capacidade de carga e rigidez ao mancal. Já os mancais axiais suportam cargas na direção axial e apresentam normalmente formas planas circulares (um restritor central de alimentação) ou anulares (vários restritores

dispostos circunferencialmente). Tanto os mancais radiais como os axiais, podem apresentar a forma cônica ou esférica [POWELL, 1970 ; SLOCUM, 1992].

Os mancais aerostáticos são também classificados quanto ao tipo de compensação (restrição) que utilizam [CHENG & ROWE, 1995]. A Tabela 1 ilustra as características dos restritores mais utilizados em mancais aerostáticos. Os restritores de orifício são os mais utilizados.

Tabela 1 - comparação dos restritores mais utilizados no projeto dos mancais aerostáticos. (CHENG & ROWE, 1995).

Tipo de Restritor	Vantagens	Desvantagens
<p>Orifício com rebaixo</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Esta é a geometria mais comum e proporciona maior rigidez 	<ul style="list-style-type: none"> • Pode propiciar instabilidade aerostática conhecida como martelo pneumático. • Fabricação mais difícil.
<p>Orifício sem rebaixo</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Mais simples forma de construção do mancal e não ocorre o martelo pneumático. 	<ul style="list-style-type: none"> • A capacidade de carga e rigidez são 33% menor que os mancais de orifícios com rebaixo.
<p>Ranhura</p> 	<ul 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 style="list-style-type: none"> • As ranhuras apresentam maior dificuldade de fabricação e estão sujeitas ao entupimento.
<p>Poroso</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Devido a maior distribuição de ar na alimentação, pode proporcionar alta capacidade de carga. • construção (estrutura) simples. 	<ul 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.

4 SÍNTESE DA METODOLOGIA DE PROJETO

O método de cálculo aqui apresentado permite ao projetista estimar a capacidade de carga, vazão, rigidez e dimensões do mancal para os mancais aerostáticos radiais com orifícios de alimentação. As seguintes relações expressando a capacidade de carga, vazão de ar e rigidez do filme lubrificante, estão envolvidas [POWELL, 1970]:

$$W = \bar{w} \cdot L \cdot D \cdot (P_o - P_a) \quad (3)$$

$$Q = \frac{(P_o - P_a) \cdot h_o^3 \cdot \bar{Q}}{\eta} \quad (4)$$

$$K = \frac{2 \cdot W}{h_o} \quad (0 < \varepsilon < 0,5) \quad (5)$$

O coeficiente de carga \bar{w} da expressão (3) e o coeficiente de vazão \bar{Q} da expressão (4) podem ser obtidos da Figura 3, em função da relação L/D (comprimento/diâmetro do mancal). A rigidez de um mancal aerostático com orifícios de alimentação é inversamente proporcional à folga radial com o eixo concêntrico para uma relação de excentricidade ε entre zero e meio ($0 < \varepsilon < 0,5$) e pode ser calculada pela expressão (5). O valor ótimo do fator de pressão K_{go} para o projeto de um mancal com orifícios de alimentação é 0,4, o qual proporciona-lhe a máxima capacidade de carga, e o valor recomendado para a folga de projeto h_o e pressão de alimentação P_o são respectivamente, $13\mu\text{m}$ e 0,5 MPa. A relação L/D deve ser aproximadamente 1,0 para que o mancal apresente alta capacidade de carga e rigidez. A viscosidade do ar η é $1,81 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$ nas condições normais de pressão e temperatura.

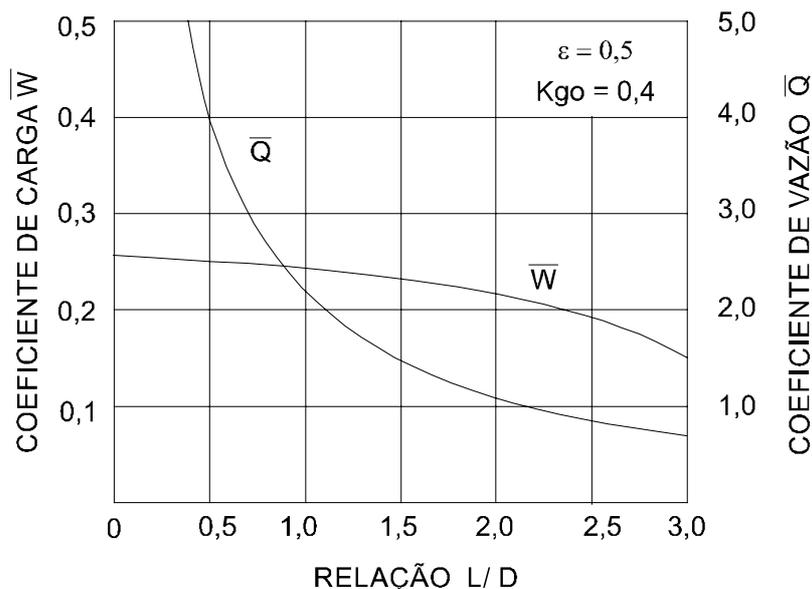


Figura 3- Variação do parâmetro de carga e vazão com a relação L/D. (BALESTRERO, 1997)

5 PROPOSTA DE UM BANCO DE ENSAIOS PARA RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

Com o objetivo de confrontar a teoria do cálculo da rigidez em eixos árvores de máquinas ferramentas, ministrado nas aulas de construção de máquinas, com dados práticos, visando uma maior motivação por parte dos alunos de Engenharia Mecânica, idealizou-se um projeto de um banco de ensaios condizente com o modelo proposto na seção 2 deste trabalho, o qual será montado futuramente no laboratório de máquinas ferramentas da Universidade Presbiteriana Mackenzie. A Figura 4 ilustra um aspecto geral do banco de ensaios proposto.

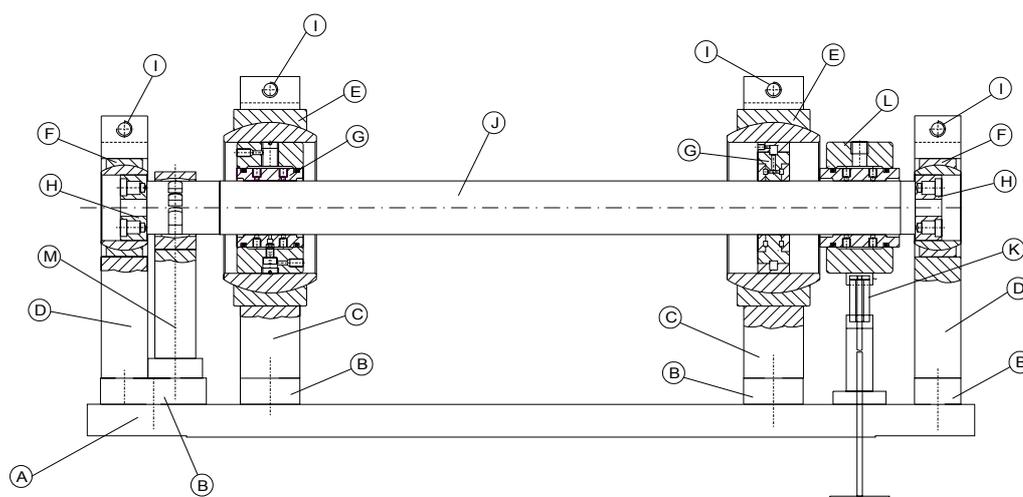


Figura 4 – Esquema do banco de ensaios para eixos árvores de precisão.

Acervo pessoal (BALESTRERO)

Observando-se a Figura 4, nota-se que o conjunto é composto de uma base de fixação (A), à qual estão fixados os calços (B) dos suportes dos mancais radiais (C) e dos mancais axiais (D).

Esta configuração, permite ensaios de eixos árvores com diversas relações b/a (vão entre mancais e distância entre mancal frontal e extremidade do eixo árvore), obtidas no banco de ensaios, com o deslocamento do calço (B) e suporte (C), nas diferentes posições na base de fixação (A). Os mancais radiais (G) são montados nas rótulas (E) e em seguida fixa-se o conjunto composto pelas rótulas e mancais aos suportes (C) e (D) pelo aperto dos parafusos (I).

O carregamento aplicado ao eixo (J) pode ser feito através do balancim de carga (K), posicionado no centro da sapata de carga (L), localizada na extremidade direita da rótula GE 100 ES (E), mantendo-se desta forma a distância entre o mancal frontal e extremidade do eixo árvore "a" constante. O acionamento do modelo do eixo árvore proposto é feito por meio de uma turbina (M) permitindo rotações de até 5.000 RPM.

O banco de ensaios pode ser informatizado e os resultados enviados a uma placa de aquisição de dados utilizando o software Lab view for Windows. A Figura 5 ilustra a disposição geral do banco de ensaios já informatizado, proposto na experimentação das configurações de eixos árvores equipados com mancais aerostáticos com restritores de orifícios de alimentação, onde pode-se obter, para diferentes relações b/a , os valores da capacidade de carga e rigidez do mancal frontal em função da folga radial, e a flexibilidade no nariz do eixo árvore em função da força aplicada, respectivamente para várias pressões de

alimentação. Também pode-se medir os parâmetros Força $F(1)$, deslocamento $\delta(2)$, rotação do eixo árvore $N(3)$ e pressão nos mancais $P_d(4)$.

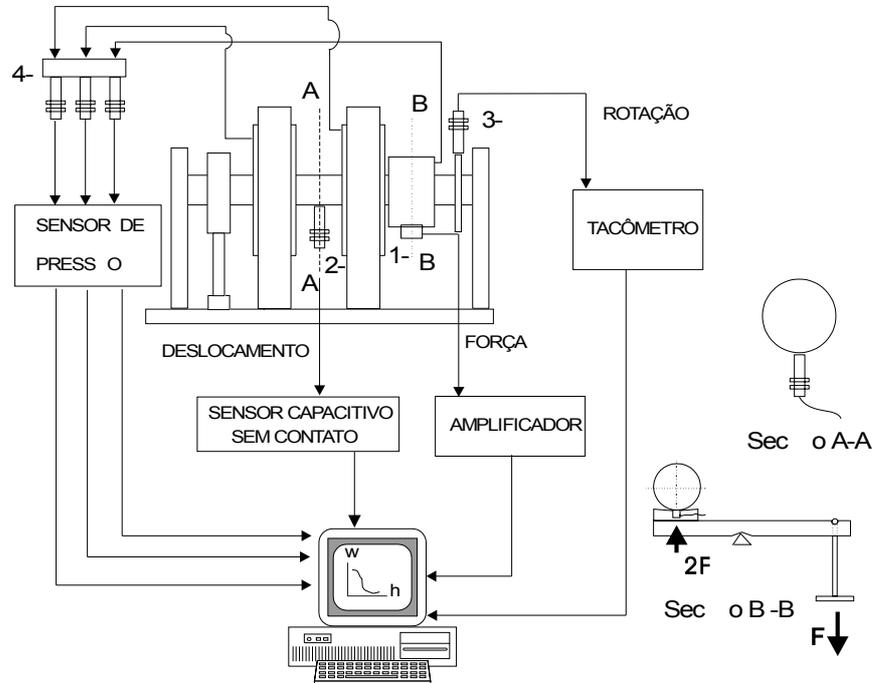


Figura 5 – Banco de ensaios para eixos árvores e sistema de medição proposto.
Acervo pessoal (BALESTRERO)

O deslocamento da árvore devido à deflexão dos mancais pode ser medido no plano A-A, e desta forma o deslocamento total na extremidade em balanço do eixo árvore em função da carga aplicada pode ser calculado e confrontado com os resultados teóricos calculados pela equação (2). Também pode-se obter experimentalmente os valores da capacidade de carga e rigidez e confrontá-las respectivamente com as equações (3) e (5).

6 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, em função da facilidade de construção e de obtenção de resultados por meio de análises do mancal e do eixo, sendo um dos principais enfoques da disciplina construção de máquinas, disciplina ministrada em diversos cursos de engenharia em todo o país, porém com maior destaque dos mancais de rolamentos padronizados.

O projeto de mancais de precisão é reconhecido pelo meio industrial de hoje como uma necessidade prioritária em função das máquinas operatrizes com elevadas velocidades angulares. Porém pelo não reconhecimento do projeto de mancais como sendo um passo importante no projeto de equipamentos, dificuldades tribológicas tem sido experimentadas pelos Engenheiros de projeto e de produção mecânica. 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 desenvolvidos na disciplina construção de máquinas no curso de Engenharia mecânica. Com a proposta da análise experimental dos modelos de eixos árvores com mancais aerostáticos, pode-se mostrar ao aluno que existe uma relação íntima entre esses experimentos e os conteúdos específicos da disciplina construção de máquinas, com o objetivo de motivá-los em suas atividades discentes, abrindo sua visão e contribuindo para a sua inclusão no mercado de trabalho.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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).

BALESTRERO, L. A. P. **Desenvolvimento de uma metodologia para a seleção de mancais de filme de fluido aerostáticos aplicada a disciplina construção de máquinas.** XXXIII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Campina Grande, Paraíba, Setembro de 2005.

BALESTRERO, L. A. P. ; SILVA, G.T. **Mancais aerostáticos e mancais convencionais.** Um estudo comparativo para fins didáticos. XXXIV Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Passo Fundo, Rio Grande do Sul, Setembro de 2006.

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 Clifffis : 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.

A PROPOSAL OF AEROSTATIC FLUID FILM BEARINGS DESIGN AND EXPERIMENTAL VALUATION APPLIED TO DISCIPLINE DESIGN OF MACHINE ELEMENTS

Abstract: *One of the principal themes 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, with the objective of motivating the students of Mechanical Engineer, this paper tries to develop of aerostatic fluid film bearings design and experimental valuation 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.*