
AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DE MANCAIS AEROSTÁTICOS PARA EIXOS-ÁRVORES DE MÁQUINAS- -FERRAMENTAS

Luiz Antonio Pinheiro Balestrero

Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM)

Resumo

Este artigo apresenta as principais características dos mancais aerostáticos aplicados a eixos-árvores de máquinas-ferramentas e uma estratégia para a sua seleção. Uma síntese teórica do cálculo da rigidez no nariz do eixo-árvore foi desenvolvida e um estudo experimental foi realizado. Nele, as características da flexibilidade no nariz do eixo-árvore, em função da pressão de alimentação, diâmetro da árvore, distância entre os mancais e distância em balanço, foram analisadas e comparadas com a literatura.

Palavras-chave: Mancais aerostáticos. Máquinas-ferramentas. Mancais radiais.

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente necessidade de alta precisão, estabilidade e elevadas rotações de trabalho, os mancais aerostáticos têm se destacado nas aplicações em máquinas-ferramentas e equipamentos de precisão. Os mancais aerostáticos, quando aplicados às 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, têm 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 costumam ser utilizados como componentes indispensáveis para máquinas-ferramentas de precisão ou máquinas especiais.

Este trabalho apresenta uma estratégia para a seleção de mancais aerostáticos para eixos-árvores de máquinas-ferramentas de precisão. Além disso, o trabalho mostra os resultados de um estudo experimental sobre o comportamento de eixos-árvores equipados com mancais aerostáticos com orifícios de alimentação em função da pressão de alimentação, diâmetro da árvore, distância entre os mancais e distância em balanço. Os resultados experimentais da rigidez do mancal frontal e da flexibilidade no nariz do eixo-árvore para as configurações estudadas são apresentados na forma de diagramas de projeto e comparados com os modelos teóricos existentes na literatura. Desse modo, estabelece-se uma faixa ótima de projeto que proporcione a mínima deflexão no nariz do eixo-árvore. Uma síntese do método de cálculo da rigidez no nariz do eixo-árvore também faz parte do contexto deste trabalho.

2 RIGIDEZ DE EIXOS-ÁRVORES COM MANCAIS AEROSTÁTICOS

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

Considerando a definição de rigidez,

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

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

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

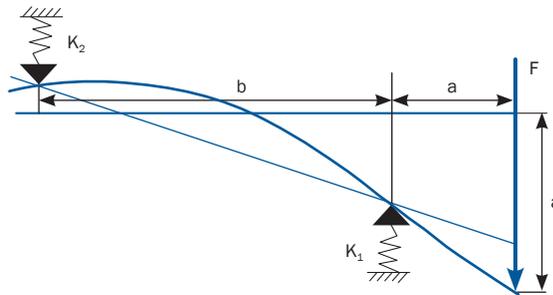


Figura 1 Deflexão de uma viga montada em suportes flexíveis

Fonte: Balestrero (1997).

em que 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, K_1 e K_2 , a rigidez do mancal frontal e traseiro, respectivamente.

O primeiro termo da Equação 2 representa a deflexão da parte em balanço para seu nariz e o segundo termo, o deslocamento no nariz do eixo-árvore produzido pela deflexão de uma simples viga suportada por dois mancais. Já 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 os fatores que influenciam no comportamento do sistema mancal aerostático – eixo-árvore e o inter-relacionamento entre eles (BALESTRERO, 1997). Observando-se a Figura 2, nota-se que os mancais aerostáticos com a respectiva configuração são selecionados em ordem crescente, obedecendo a requisitos como custo, rigidez, facilidade de fabricação e tamanho normal (parte superior da Figura 2).

Os mancais com orifícios de alimentação (Figura 2) têm um baixo custo de fabricação e uma baixa rigidez comparativa com os demais e apresentam uma alta facilidade de fabricação (só perdendo para os mancais aerodinâmicos) e um tamanho normal razoável (porte médio). Já os mancais ranhurados têm um custo de fabricação mais alto que os mancais de orifícios e alta rigidez (perdendo somente para os mancais com restritores flexíveis). Além disso, têm 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, têm uma rigidez média, uma baixa facilidade de fabricação e um grande porte (tamanho normal). Já os mancais com restritores flexíveis apresentam 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, têm 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. Dessa forma, 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, conforme Balestrero (1997), por meio de:

- 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 do tamanho normal do mancal aerostático utilizado.
- Rigidez total no nariz da árvore em função da 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.

Com o inter-relacionamento entre os parâmetros discutidos, espera-se contribuir com a extração do maior número de informações, para otimizar o projeto dos eixos-árvores para as máquinas-ferramentas de precisão equipados com mancais aerostáticos. A acuracidade de uma peça-obra produzida por uma máquina-ferramenta de precisão é determinada pela rigidez no nariz do eixo-árvore. Dessa forma, uma considerável redução nas deflexões no nariz do eixo-árvore pode ser conseguida por meio de uma correta seleção dos parâmetros geométricos do eixo-árvore e do mancal aerostático utilizado (BALESTRERO, 1997).

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

QUADRO 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.

Fonte: Cheng e Rowe (1995).

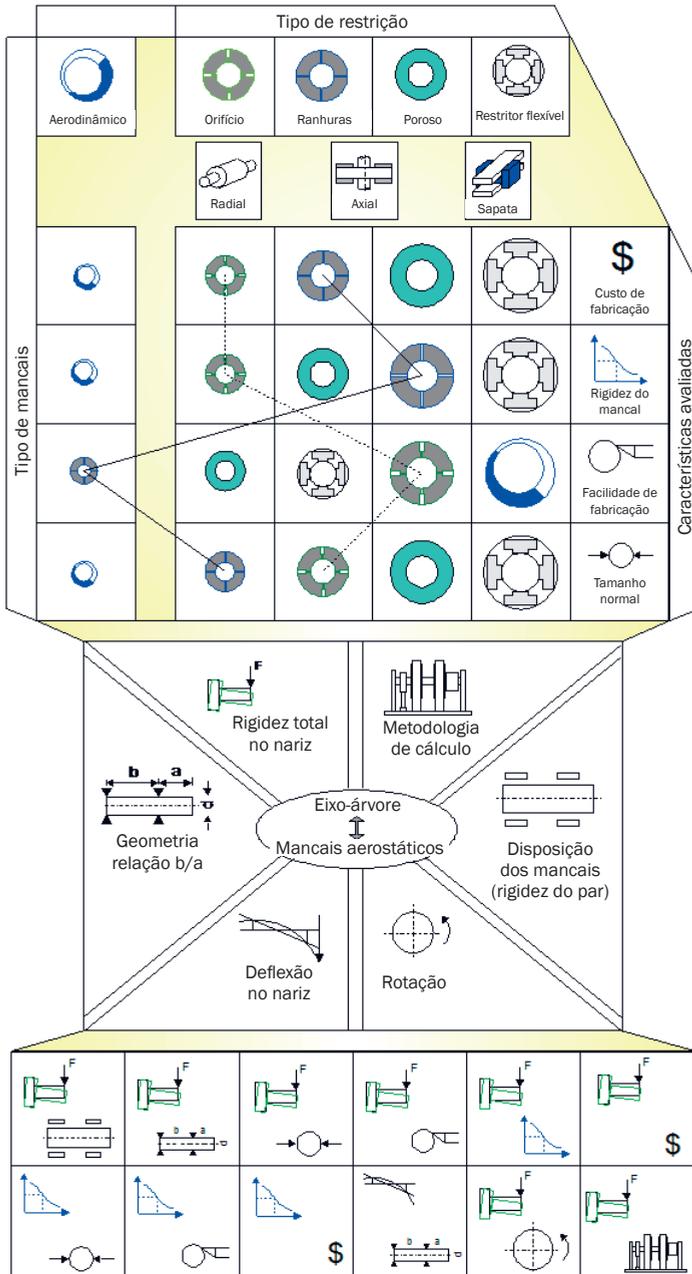


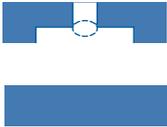
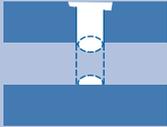
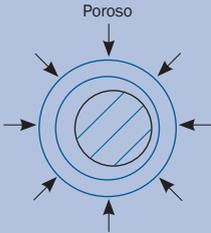
Figura 2 Inter-relacionamento dos fatores que influenciam o sistema mancal – eixo-árvore

Fonte: Balestrero (2005).

Observando o Quadro 1, nota-se que, em eixos-árvores de retificadoras em que 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. O Quadro 2 ilustra as características dos restritores mais utilizados nos mancais aerostáticos.

QUADRO 2

Comparação dos restritores mais utilizados no projeto dos mancais aerostáticos

Tipo de restritor	Vantagens	Desvantagens
<p>Orifício com rebaixo</p> 	<p>Esta é a geometria mais comum e proporciona maior rigidez.</p>	<p>Pode propiciar a instabilidade aerostática conhecida como martelo pneumático. Fabricação mais difícil.</p>
<p>Orifício sem rebaixo</p> 	<p>Mais simples forma de construção do mancal; não ocorre o martelo pneumático.</p>	<p>A capacidade de carga e rigidez é 33% menor que os mancais de orifícios com rebaixo.</p>
<p>Ranhura</p> 	<p>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. Livres do martelo pneumático.</p>	<p>As ranhuras apresentam maior dificuldade de fabricação e estão sujeitas a entupimento.</p>
<p>Poroso</p> 	<p>Devido à maior distribuição de ar na alimentação, pode proporcionar alta capacidade de carga. Construção (estrutura) simples.</p>	<p>Largas folgas. Permeabilidade imprevisível. As características de queda de pressão são uma complexa função das dimensões do mancal e das propriedades do fluido.</p>

Fonte: Cheng e Rowe (1995).

Na prática, a seleção do tipo do restritor é realizada em paralelo com a configuração do mancal, por ambos apresentarem a mesma importância no desempenho operacional do mancal (CHENG; ROWE, 1995). Dessa forma, a metodologia de projeto a ser utilizada no cálculo dos valores da rigidez no nariz de um eixo-árvore, conforme o ilustrado na Figura 1, para uma determinada relação b/a , deve apresentar os seguintes passos:

- Seleção de uma configuração apropriada para os mancais aerostáticos radiais utilizados (Quadro 1).
- Seleção do restritor de alimentação (Quadro 2).
- Cálculo das dimensões do restritor, capacidade de carga e rigidez do mancal (BALESTRERO, 1997).
- Cálculo da flexibilidade no nariz da árvore $1/R_1$, devido à deformação dos mancais (3º e 4º termo da Equação 2).
- Cálculo da flexibilidade no nariz da árvore $1/R_2$, devido à deflexão da própria árvore (1º e 2º termo da Equação 2).
- Cálculo da rigidez total no nariz da árvore (Equação 2).

4 ENSAIOS, RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

TABELA 1

Principais características das configurações de eixos-árvores ensaiadas

Características	Número do vão							
	1	3	4	6	2	5	8	7
Relação b/a	3,09	3,63	2,72	2,36	1,7	1,5	1,3	1,08
Vão entre mancais b [mm]	170	200	150	130	170	150	130	130
Relação a/d	1,34				2,44		2,92	
Comprimento em balanço a [mm]	55			100			120	
Pressão de alimentação [MPa]	0,3 a 0,6 MPa							

Fonte: Balestrero (1997).

A Tabela 1 ilustra as principais características das configurações ensaiadas de eixos-árvores equipados com mancais aerostáticos com orifícios de alimentação. Nos ensaios experimentais, obtiveram-se, para diferentes relações b/a (vão entre mancais/comprimento em balanço), 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 (BALESTRERO, 1997).

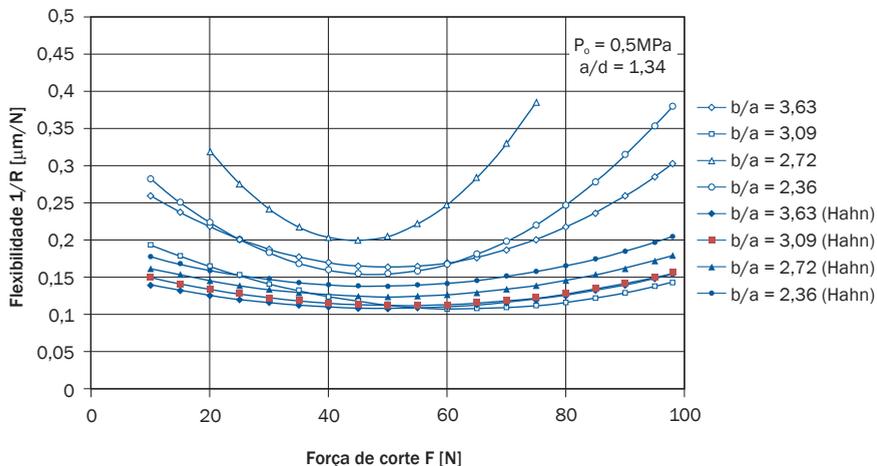


Gráfico 1 Flexibilidade no nariz do eixo-árvore x força de corte com os vãos 1, 3, 4 e 6. Comparação com os modelos teóricos

Fonte: Balestrero (1997).

O Gráfico 1 ilustra as curvas da flexibilidade no nariz do eixo-árvore em função da força aplicada para a relação $a/d = 1,34$ a uma pressão $P_0 = 0,5 \text{ MPa}$. Analisando o Gráfico 1, nota-se que as configurações $b/a = 3,09$ (vão 1) e $2,36$ (vão 6) foram as que apresentaram a menor flexibilidade (maior rigidez) no nariz do eixo-árvore para uma mesma força de corte, embora a rigidez do vão 1 seja 43% maior.

Já os vãos 2, 5 e 8 ($b/a = 1,7, 1,5$ e $1,3$) para a relação $a/d = 2,44$ não apresentaram um bom desempenho, devido às mais altas flexibilidades (menores rigidez) apresentadas no nariz do eixo-árvore. Portanto, pode-se concluir que uma ótima relação b/a para o projeto de eixos-árvores situa-se entre $2,36$ e $3,09$.

Com as curvas do Gráfico 1, encontra-se o modelo teórico proposto por Hahn (1974), que por sua vez, apresentou uma previsão menor (rigidez menor) para o vão 1 ($b/a = 3,09$), com variação de 3,7%, e um pouco além (mais rígido) com variação de 11% para o vão 6 ($b/a = 2,36$).

A partir dos valores mínimos da flexibilidade para cada configuração de eixo-árvore ensaiada, construiu-se um diagrama de projeto para as pressões $0,3$ a $0,6 \text{ MPa}$, indicando a faixa ótima de operação que proporciona a mínima deflexão no nariz do eixo-árvore, conforme ilustra o Gráfico 2.

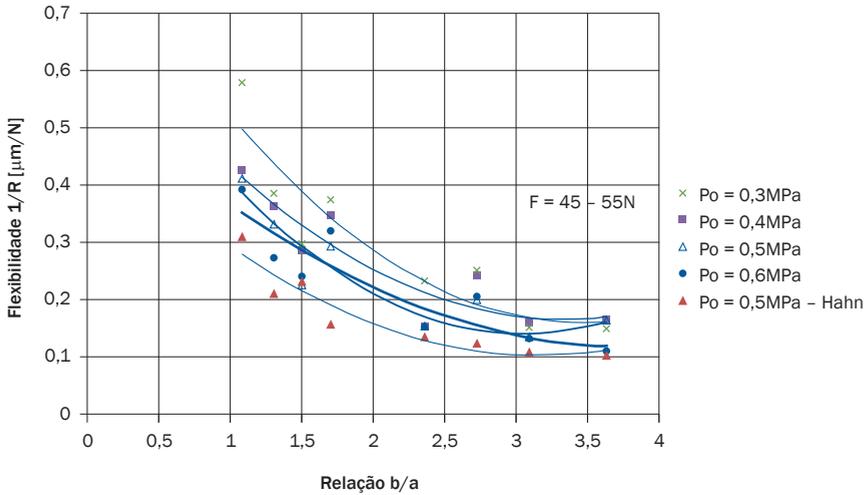


Gráfico 2 Flexibilidade no nariz do eixo-árvore x relação b/a. Comparação com o modelo teórico segundo Hahn

Fonte: Balestrero (1997).

Analisando esse gráfico, nota-se que a pressão de alimentação aumenta com o decréscimo da flexibilidade, excetuando-se a faixa entre $b/a = 1,78$ a $2,8$ à pressão $P_o = 0,6$ Mpa, devido à ocorrência do fenômeno denominado *martelo pneumático nos ensaios*. Pode-se perceber, ainda, que a tendência de inclinação das curvas é praticamente a mesma para todas as pressões de alimentação, inclusive para o modelo teórico previsto por Hahn (1974), o qual se aproxima bastante do modelo real, proporcionando uma faixa ótima de projeto da relação b/a, praticamente idêntica para todas as pressões de alimentação, situando-se em torno de 2,9 a 3,1 MPa. Isso fortalece a confiabilidade dos resultados obtidos.

EVALUATION AND SELECTION OF AEROSTATIC BEARINGS FOR MACHINE TOOL SPINDLES

Abstract

This article presents the main characteristics of aerostatic bearing applied in machine tools spindles and proposes a selection methodology. A theoretical synthesis of machine tools spindles is presented. The stiffness of spindle nose characteristics obtained experimentally in a sensed test rig as functions of the supply pressure, spindle

overhang and the distance between bearings are analysed and compared with the literature.

Keywords: Aerostatic bearings. Machine tools. Journal bearings.

REFERÊNCIAS

BALESTRERO, L. A. P. *Uma avaliação de mancais aerostáticos para máquinas ferramentas: estudo e dimensionamento de eixos árvores*. 208 p. 1997. Tese (Doutorado em Tribologia)– Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

BALESTRERO, L. A. P. Desenvolvimento de uma metodologia para a seleção de mancais de filme de fluido aerostáticos aplicada a disciplina construção de máquinas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 33., 2005, Campina Grande. *Anais...* Campina Grande: UFCG, 2005. p. 1-9.

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*, v. 114, p. 244-253, May 1992.

CHENG, K.; ROWE, W. B. A selection strategy for the design of externally pressurized journal bearings. *Tribology International*, v. 28, n. 7, p. 465-474, 1995.

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

SHUZZI, Y. A study of static stiffness of machine tool spindles. *Int. J. Mach. Toll Des Res*, v. 21, n. 1, p. 23-40, 1981.

Contato

Luiz Antonio Pinheiro Balestrero
balestrero@mackenzie.br