

**PROJETO, FABRICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO DE UM
MANCAL AEROSTÁTICO DUPLO-ESFÉRICO**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**PROJETO, FABRICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO DE UM MANCAL
AEROSTÁTICO DUPLO-ESFÉRICO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA

PAULO ROBERTO MIRANDA DE OLIVEIRA

FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 1994.

PROJETO, FABRICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO DE UM MANCAL
AEROSTÁTICO DUPLO-ESFÉRICO

PAULO ROBERTO MIRANDA DE OLIVEIRA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



PROF. DR. -ING. WALTER L. WEINGAERTNER - ORIENTADOR



PROF. ANTÔNIO FÁBIO CARVALHO DA SILVA, DR. ENG. MEC.
COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA



PROF. DR. -ING. WALTER L. WEINGAERTNER - PRESIDENTE



PROF. NELSON BACK - PhD

PROF. ALVARO T. PRATA - PhD

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos mais sinceros são para:

- DEUS, pela vida e pelas eternas bênçãos;
- meus pais, Roberto e Alcy, pelo amor e pela educação que me deram;
- Prof. Walter L. Weingaertner pela orientação nesta dissertação;
- amigos do LMP pelo constante apoio em todos os momentos;
- CNPq pelo patrocínio da bolsa de estudos;
- EMBRACO, pelo apoio na finalização do trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
SIMBOLOGIA	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	6
2.1 Aspectos gerais	6
2.2 Restritores	6
2.2.1 Restritor de orifício sem rebaixo	7
2.2.2 Restritor de orifício com rebaixo	8
2.2.3 Restrição por ranhuras	9
2.2.4 Capilares	10
2.2.5 Restritores porosos	10
2.2.6 Restritores flexíveis	10
2.3 Tipos de mancais	11
2.4 Propriedades gerais	12
2.5 Aplicações	14
2.5.1 Retificação	14
2.5.2 Furação	16
2.5.3 Torneamento com ferramenta de diamante	16
2.5.4 Medição de circularidade	16
2.5.5 Máquinas de medir por coordenadas	17
3. PROJETO DO MANCAL	18
3.1 Critérios adotados	20
3.1.1 Esférico	20

3.1.2 Dimensões	20
3.1.3 Número de carreiras de restritores	22
3.1.4 Número de restritores por carreira	22
3.1.5 Número de entradas de ar por carreira	23
3.1.6 Folga	23
3.1.7 Diâmetro dos restritores	23
3.1.8 Mancal radial cilíndrico	24
3.1.9 Ajuste da folga	24
3.1.10 O'ring	24
3.1.11 Furos roscados	25
4. PROCESSO DE FABRICAÇÃO	26
4.1 semi-esferas	26
4.2 Rosca de ajuste da excentricidade axial inicial	28
4.3 Técnica de moldagem em resina	28
4.4 Ajuste da folga	30
5. MONTAGEM E AJUSTES	33
5.1 Ajuste da excentricidade axial inicial	33
5.2 Limpeza das peças	33
5.3 Batimento axial do conjunto eixo/esfera	34
6. ENSAIOS EXPERIMENTAIS	36
6.1 Aspectos gerais	36
6.2 Preparação do mancal	37
6.3 Montagem dos experimentos	41
6.4 Análise de erros	42

7. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS	46
8. CONCLUSÕES	87
8.1 Sobre o projeto	87
8.1.1 Mancal esférico.....	87
8.1.2 Técnica de moldagem em resina	95
8.1.3 Bronze	95
8.1.4 Restritores	95
8.1.5 Rosca de ajuste da excentricidade	96
8.1.6 O'ring	96
8.2 Sobre a fabricação	96
8.3 Sobre os experimentos	97
8.4 Sobre o desempenho do mancal	97
8.4.1 Número de restritores	97
8.4.2 Número de carreiras de restritores	98
8.4.3 Excentricidade relativa axial inicial	98
8.4.4 Número de entradas de ar	98
8.4.5 Pressão de alimentação	98
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 - Tipos de restritores utilizados em mancais aerostáticos.
- Figura 2.2 - Restritor de orifício com rebaixo (à esquerda) e sem rebaixo (à direita).
- Figura 2.3 - Tipos construtivos de mancais aerostáticos.
- Figura 2.4 - Esquema da retificação rotativa.
- Figura 3.1 - Desenho esquemático do mancal aerostático base deste trabalho.
- Figura 4.1 - Esquema do processo de lapidação das semi-esferas.
- Figura 4.2 - Esquema do processo de "costura" do fio de náilon para confecção dos restritores.
- Figura 4.3 - Esquema dos defeitos de moldagem na resina, antes da lapidação.
- Figura 4.4 - Esquema dos defeitos de moldagem remanescentes, após a lapidação.
- Figura 6.1 - Condição da fenda de ar em função da posição relativa entre semi-esfera e estator.
- Figura 6.2 - Esquema do ensaio de carga axial.
- Figura 6.3 - Esquema do ensaio de carga radial.
- Figura 6.4 - Esquema do ensaio de carga de momento.
- Figura 7.1 - Capacidade de carga axial em função da excentricidade relativa axial para diferentes números de carreiras, para 16-20-24 restritores.
- Figura 7.2 - Rigidez axial em função da excentricidade relativa axial, variando o número de carreiras, para 16-20-24 restritores.
- Figura 7.3 - Capacidade de carga axial em função da excentricidade relativa axial para uma e duas entradas de ar por carreira, para o mancal com uma carreira de 20 restritores, com razão de pressão de alimentação igual a 6.
- Figura 7.4 - Rigidez axial em função da excentricidade relativa axial para o mancal com uma carreira de 20 restritores, sendo alimentada por uma e duas entradas de ar, com $(P_o - P_a)/P_a = 6$.
- Figura 7.5 - Capacidade de carga axial em função da excentricidade relativa axial, para diferentes valores de ajustagem da excentricidade relativa axial inicial. O mancal foi testado com três carreiras de restritores (16-20-24).

- Figura 7.6 - Rigidez axial em função da excentricidade relativa axial, para diferentes valores de ajustagem da excentricidade relativa axial inicial. Mancal testado com três carreiras de restritores (16-20-24).
- Figura 7.7 - Capacidade de carga axial em função da excentricidade relativa axial, para o mancal com uma, duas e três carreiras de 8-10-12 restritores.
- Figura 7.8 - Rigidez axial em função da excentricidade relativa axial, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 8-10-12 restritores.
- Figura 7.9 - Capacidade de carga axial em função da excentricidade relativa axial, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 4-5-6 restritores.
- Figura 7.10 - Rigidez axial em função da excentricidade relativa axial, para o mancal com uma, duas e três carreiras de 4-5-6 restritores.
- Figura 7.11 - Força axial em função da excentricidade relativa axial, para o mancal com diferentes números de restritores nas três carreiras.
- Figura 7.12 - Rigidez axial em função da excentricidade relativa axial, para o mancal com diferentes números de restritores com três carreiras.
- Figura 7.13 - Capacidade de carga de momento em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera em relação ao anel externo do mancal, para uma, duas e três carreiras com 16-20-24 restritores.
- Figura 7.14 - Rigidez angular em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 16-20-24 restritores.
- Figura 7.16 - Rigidez angular em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para diferentes razões de pressão de alimentação.
- Figura 7.17 - Capacidade de carga de momento em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com uma carreira de 20 restritores, alimentado com uma e duas entradas de ar.
- Figura 7.18 - Rigidez angular em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com uma carreira de 20 restritores, alimentado por uma e duas entradas de

ar.

- Figura 7.19 - Capacidade de carga de momento em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para diferentes condições de excentricidade relativa axial inicial.
- Figura 7.20 - Rigidez angular em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para diferentes ajustes da excentricidade relativa axial inicial.
- Figura 7.21 - Capacidade de carga de momento em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 8-10-12 restritores.
- Figura 7.22 - Rigidez angular em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 8-10-12 restritores.
- Figura 7.23 - Capacidade de carga de momento em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 4-5-6 restritores.
- Figura 7.24 - Rigidez angular em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 4-5-6 restritores.
- Figura 7.25 - Capacidade de carga de momento em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com três carreiras e diferentes números de restritores.
- Figura 7.26 - Rigidez angular em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com três carreiras e diferentes números de restritores.
- Figura 7.27 - Capacidade de carga radial em função da excentricidade radial, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 16-20-24 restritores.
- Figura 7.28 - Rigidez radial em função da excentricidade radial, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 16-20-24 restritores.
- Figura 7.29 - Capacidade de carga radial em função da excentricidade radial, para o mancal com uma carreira de 20 restritores, alimentado por uma e duas entradas de ar.
- Figura 7.30 - Rigidez radial em função da excentricidade radial, para o mancal com uma carreira de 20 restritores, alimentado por uma e duas entradas de ar.
- Figura 7.31 - Capacidade de carga radial em função da excentricidade radial, para o mancal com duas carreiras de 16-24 restritores, para razões de pressão de alimentação igual a 4

e a 6.

Figura 7.32 - Rigidez radial em função da excentricidade radial, para o mancal com duas carreiras de 16-24 restritores, para razões de pressão de alimentação igual a 4 e 6.

Figura 7.33 - Capacidade de carga radial em função da excentricidade radial, para o mancal com três carreiras de 16-20-24 restritores, ajustado para excentricidade relativa axial inicial (ϵ_{ao}) menor, igual e maior que zero.

Figura 7.34 - Rigidez radial em função da excentricidade radial, para o mancal com três carreiras de 16-20-24 restritores, ajustado para excentricidade relativa axial inicial (ϵ_{ao}) menor, igual e maior que zero.

Figura 7.35 - Capacidade de carga radial em função da excentricidade radial, para o mancal com uma, duas e três carreiras de 8-10-12 restritores.

Figura 7.36 - Rigidez radial em função da excentricidade radial, para o mancal com uma, duas e três carreiras de 8-10-12 restritores.

Figura 7.37 - Capacidade de carga radial em função da excentricidade radial, para o mancal com uma, duas e três carreiras de 4-5-6 restritores.

Figura 7.38 - Rigidez radial em função da excentricidade radial, para o mancal com uma, duas e três carreiras de 4-5-6 restritores.

Figura 7.39 - Capacidade de carga radial em função da excentricidade radial, para o mancal com três carreiras com diferentes números de restritores.

Figura 7.40 - Rigidez radial em função da excentricidade radial, para o mancal com três carreiras com diferentes números de restritores.

Figura 8.1 - Distribuição de pressão na fenda de ar, ao longo da circunferência que passa pelos restritores (ângulo ω).

Figura 8.2 - Distribuição de pressão na fenda de ar, ao longo do arco que une o pólo ao equador da semi-esfera, e é descrito pelo ângulo ϕ .

Figura 8.3 - Comparação entre os valores calculados pelo AEROSTA e os resultados experimentais obtidos neste trabalho, para o mancal com uma carreira de restritores.

Figura 8.4 - Comparação entre os valores calculados pelo AEROSTA e os resultados experimentais obtidos neste trabalho, para o mancal com duas carreiras de restritores.

Figura 8.5 - Comparação entre os valores calculados pelo AEROSTA e os resultados experimentais obtidos neste trabalho, para o mancal com três carreiras de restritores.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Valores obtidos com o programa AEROSTA, para um mancal aerostático duplo-esférico, semelhante ao deste trabalho: esferas de raio igual a 50 mm; distância entre centros de 145,2 mm; diâmetro dos restritores de 0,18 mm; rebaixo dos restritores com diâmetro de 1,3 mm e profundidade de 0,1 mm.

SIMBOLOGIA

F_a	[N]	Força axial
F_r	[N]	Força radial
M	[Nm]	Momento
h_0	[μm]	Folga entre esfera e estator quando estes se encontram concêntricos
e_r	[μm]	Excentricidade radial, ou seja, distância entre o centro geométrico da esfera e do estator, medida na direção perpendicular ao eixo de giro do conjunto eixo/esfera.
e_a	[μm]	Excentricidade axial, medida na direção do eixo de giro do conjunto eixo/esfera.
ε_a	-----	Excentricidade relativa axial ($\varepsilon_a = e_a/h_0$)
ε_{a0}	-----	Excentricidade relativa axial inicial, ou seja, ε_a quando $F_a = F_r = M = 0$.
ε_r	-----	Excentricidade relativa radial ($\varepsilon_r = e_r/h_0$)
θ	[μrad]	Deslocamento angular em torno do centro de gravidade do conjunto eixo/esfera.
ω	[rad]	Ângulo contido no plano da face das semi-esferas, e que varia de 0 a 2π .
φ	[rad]	Ângulo contido no plano que contém o eixo que une as duas semi-esferas, e que passa por um restritor. Varia de 0 a $\pi/2$, no máximo.
K_a	[N/ μm]	Rigidez axial ($K_a = dF_a/de_a$)
K_r	[N/ μm]	Rigidez radial ($K_r = dF_r/de_r$)
K_θ	[Nm/ μrad]	Rigidez angular ($K_\theta = dM/d\theta$)
P_o	[Pa]	Pressão de alimentação (absoluta).
P_a	[Pa]	Pressão ambiente (absoluta)
$(P_o - P_a)/P_a$	-----	Razão de pressão de alimentação.

SM	-----	Sistema de medição.
GM	-----	Grandeza a medir.
Im	-----	Incerteza de medição (unidade depende do SM).
UTS	-----	Unidade de tratamento de sinais.

RESUMO

Esta dissertação de mestrado tem por objetivo aumentar o conhecimento sobre mancais aerostáticos esféricos. Para isso, um mancal aerostático duplo-esférico foi projetado, fabricado e qualificado. São descritos detalhes pertinentes às atividades de projeto, fabricação, montagem, ajustes, experimentos, resultados e as conclusões do trabalho.

A análise do mancal construído foi feita através dos resultados experimentais obtidos, quando se verificou a influência de fatores específicos: número de restritores, número de carreiras de restritores, pressão de alimentação, número de entradas de ar por carreira e excentricidade relativa axial inicial. Estes fatores foram analisados sob o ponto de vista de carregamento axial, radial e de momento.

Os resultados obtidos fornecem informações para um projeto otimizado de mancais aerostáticos duplo-esféricos

ABSTRACT

This master's dissertation aims the increase of the knowledge about spherical air bearings. Therefore, a double-spherical air bearing was designed, manufactured and qualified. The details concerning design, manufacturing processes, assembly of the components, adjustments required, experiments, results and conclusions are presented.

The air bearing was analysed through experimental data, which was obtained in order to verify the influence of some variables: number of restrictors, number of rows of restrictors, input pressure, number of air inlets per row and initial axial excentricity. These variables were analyzed under axial, radial and tilt loads.

The results and conclusions give information about the optimized design of double-spherical air bearings.

1. INTRODUÇÃO

Os primeiros estudos sobre lubrificação a gás remontam a mais de 100 anos, porém seu maior desenvolvimento, principalmente na aplicação para mancais aerostáticos, teve grande impulso nos anos que se seguiram à Segunda Guerra Mundial. Isto ocorreu devido ao fato das indústrias nuclear e bélica terem se expandido rapidamente nos anos 40.

Nas décadas de 50 e 60, grande parte dos trabalhos era experimental, pois buscava-se resolver problemas relativos ao projeto dos mancais. Paralelamente, sempre se buscou um embasamento teórico que pudesse descrever melhor o comportamento de tais mancais e auxiliar no projeto. A grande barreira para o desenvolvimento destas teorias, porém, eram as limitações dos sistemas computacionais.

Atualmente busca-se o aprimoramento de trabalhos experimentais que possam ser utilizados para a validação de teorias mais exatas sobre o comportamento de tais mancais. Procura-se, também, desenvolver novas aplicações, novos tipos e novas técnicas de fabricação.

No Brasil, os mancais aerostáticos surgiram há bem menos tempo. Na década de 70, os primeiros trabalhos foram realizados na Escola de Engenharia de São Carlos (USP).

Na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), os trabalhos na área de mecânica de precisão começaram em 1975, a partir de uma dissertação de mestrado sobre mancais hidrostáticos para máquinas-ferramentas, realizada por Leal (1), junto ao Laboratório de Projeto. Em 1983 foram retomadas as atividades na área de mecânica de precisão, no então Laboratório de Máquinas-ferramentas.

Em 1986 foi feito o primeiro trabalho com mancais aerostáticos, que surgiu da necessidade de fabricação de um torno de ultraprecisão para a usinagem de cilindros para fotocopiadoras. Este projeto foi encomendado pela NASHUA do Brasil e rendeu ao Laboratório de Máquinas-ferramentas o Prêmio de Mecânica de Precisão da Fundação Yehan Numata, e o Prêmio de Desenvolvimento Tecnológico MCT-ABIMAQ/1988.

A partir daí, a importância do conhecimento mais profundo do comportamento de mancais aerostáticos fez-se presente. Um primeiro trabalho, que resultou em uma tese de

doutorado (2), tratou do projeto, fabricação e testes de um mancal aerostático esférico-plano. Paralelamente, dois trabalhos que resultaram em dissertações de mestrado trataram de assuntos relacionados a esta tecnologia. Um buscou determinar o melhor processo de fabricação de semi-esferas para a utilização em mancais aerostáticos (3); o outro cuidou do desenvolvimento de guias lineares aerostáticas, seu projeto, fabricação e testes (4).

Na seqüência dos trabalhos foi desenvolvido um cabeçote para fabricação de lentes de contato, encomendado pela empresa OPTOLENTES de Porto Alegre. Este cabeçote consistia de um mancal aerostático duplo-esférico, acionado por turbina a ar, para rotações de até 20.000 rpm. Este mancal foi projetado com base em alguns dados experimentais disponíveis, que já haviam sido utilizados em trabalhos anteriores.

Durante a execução deste trabalho, algumas idéias - que, aliás, deram origem à presente dissertação - para o aprimoramento do projeto e do desempenho de mancais aerostáticos esféricos foram surgindo.

O objetivo deste trabalho é suprir com dados experimentais a falta de informações de projeto e de teorias que descrevam o comportamento de mancais aerostáticos esféricos.

Teorias e dados de projeto existem, mas para outros tipos de mancais aerostáticos, como cilíndricos ou planos, por exemplo. No caso de mancais esféricos, pouco existe. Isto talvez ocorra devido às vantagens dos outros tipos de mancais em relação ao esférico, tais como: maior facilidade no modelamento matemático, melhor desempenho estático e dinâmico; maior compacidade, dentre outras. Em contrapartida, a facilidade de fabricação dos mancais esféricos, principalmente devido à utilização da técnica de moldagem em resina (descrita no Cap. 4), fez com que se optasse pelo desenvolvimento de mancais do tipo esférico no Laboratório de Máquinas-ferramentas, o qual, a partir de 1990, passou a chamar-se Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP).

A técnica de moldagem em resina permite que, pela utilização de máquinas-ferramentas convencionais, se fabriquem duas superfícies esféricas de boa qualidade. A diferença no raio destas superfícies é na ordem de grandeza da folga de projeto do mancal (15 a 20 μm). Obtêm-se

restritores de 0,18 mm de diâmetro, sem necessidade de furação com broca. Esta técnica será descrita mais adiante, no capítulo referente à fabricação do mancal (Cap. 4 - Processo de fabricação).

Cinco parâmetros foram escolhidos para serem analisados neste trabalho. Mais uma vez vale lembrar que estes parâmetros foram selecionados em função da experiência acumulada em um projeto anterior de um sistema de torneamento de lentes de contato. Assim, decidiu-se avaliar a influência dos seguintes parâmetros:

- (a) número de restritores;
- (b) número de carreiras de restritores;
- (c) número de entradas de ar por carreira;
- (d) sistema de ajuste da excentricidade axial inicial;
- (e) excentricidade relativa axial.

Os detalhes do projeto e os critérios adotados para a escolha de variáveis serão tratados em capítulo específico (Cap. 3 - Projeto do Mancal).

Além da análise da influência dos parâmetros citados, este trabalho tem outros objetivos, a saber.

* Buscar soluções para problemas de fabricação dos componentes:

Uma das deficiências do LMP é a falta de máquinas-ferramentas de precisão adequadas para a fabricação de mancais. Desta maneira, uma das preocupações constantes ao longo do trabalho foi de determinar um processo de fabricação cuidadoso e que gerasse os menores erros de fabricação possíveis. Além disso, os erros que não pudessem ser evitados deveriam ser corrigidos de alguma forma por trabalhos posteriores de lapidação, lixamento etc.

* Estabelecer uma metodologia confiável de experimentos:

Como este aspecto é de fundamental importância para a validade dos experimentos, dedicou-se muito trabalho à redução, ao máximo, das fontes de erros existentes.

* Equipar o LMP com um mancal aerostático modular:

Esta é uma forma de auxiliar no aprimoramento do processo de fabricação de mancais aerostáticos e outros componentes de mecânica de precisão. Mancais aerostáticos podem ser utilizados em diversas aplicações, dentre as quais a utilização em retificação rotativa (a peça a ser retificada é montada sobre o mancal aerostático), torneamento de precisão (o mancal é usado como árvore, onde a peça pode ser fixada, ou como porta-ferramenta para torneamento de esferas), medição de circularidade (o mancal fornece um movimento rotativo que serve como referência), dentre outras.

Com base no que foi dito, esta dissertação foi estruturada de maneira a destacar as principais contribuições geradas por este trabalho.

No capítulo que segue esta introdução (Cap. 2 - Revisão da literatura), será apresentada uma revisão bibliográfica sobre mancais aerostáticos, com destaque para algumas aplicações, vantagens e desvantagens em relação a outros tipos de mancais.

No Capítulo 3 - Projeto do mancal, será apresentada a metodologia de projeto adotada, explicando o porquê dos critérios adotados.

Seguindo o projeto, a fabricação será abordada no Capítulo 4 - Processo de fabricação. Procurar-se-á focar os problemas encontrados, as soluções adotadas. Serão apresentadas, também, algumas sugestões para trabalhos futuros relativos à fabricação de precisão.

O Capítulo 5 - Montagem e ajustes, tratará da montagem e dos ajustes realizados para a colocação do mancal em operação. Muitos aspectos, sobre os quais serão tecidos alguns comentários, tornam-se relevantes quando se passa a trabalhar na escala micrométrica.

No Capítulo 6 - Ensaios experimentais, será descrita em detalhes a metodologia de ensaios, com a análise de erros, e uma avaliação da confiabilidade dos resultados. No Capítulo 7 - Resultados dos experimentos, serão mostrados os gráficos gerados com os dados experimentais, acompanhados de uma análise sobre o que isto representa a nível de desempenho do mancal.

Finalmente, as conclusões serão apresentadas no Capítulo 8, junto com algumas sugestões para trabalhos posteriores.

No Capítulo 9 serão apresentadas as referências bibliográficas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Uma grande quantidade de informações sobre mancais aerostáticos vem sendo gerada, principalmente a partir dos anos posteriores à Segunda Guerra Mundial. Assim, o objetivo deste capítulo é organizar as informações de maneira a caracterizar os mancais aerostáticos, suas propriedades, vantagens, desvantagens e aplicações.

2.1 Aspectos Gerais

Mancais aerostáticos utilizam um filme fino de ar a alta pressão para suportar uma carga. Como o ar tem uma viscosidade muito baixa, as folgas entre as superfícies dos mancais são pequenas, na ordem de 1 a 10 μm (5).

A capacidade de carga resulta da distribuição de pressão, e a rigidez é obtida pela forma da folga entre as superfícies ou por restritores, que controlam o fluxo de ar na entrada da folga (6).

Basicamente, a pressão é máxima na posição dos restritores, onde ocorre a entrada de ar sob pressão, e cai gradativamente ao longo da folga até a pressão atmosférica. Quanto menor for a folga, maior será a dificuldade do ar para escapar, e maior será a carga que o mancal pode suportar (7).

2.2 Restritores

A função dos restritores é crucial para a obtenção da rigidez do filme de ar (8). Uma queda de pressão entre a pressão de alimentação e a pressão no filme deve ser gerada no restritor de forma que a pressão no filme de ar possa compensar variações no carregamento, dando assim, rigidez ao filme (9). Esta queda de pressão ocorre devido à aceleração do gás quando este se expande (5).

Existem seis tipos de restritores mais conhecidos, conforme Fig. 2.1.

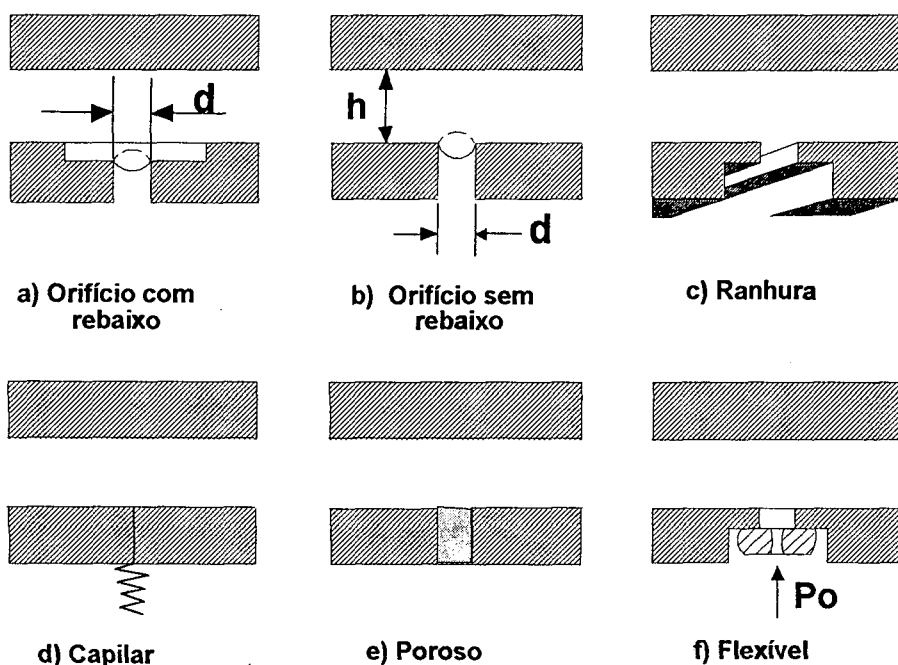


Figura 2.1 - Tipos de restritores utilizados em mancais aerostáticos.

2.2.1 Restritor de Orifício sem Rebaixo

Neste tipo de restritor, que pode ser obtido por furação ou por utilização de bujões roscados ou colados nos furos do mancal, a restrição é devida à "área de cortina", πdh (Fig. 2.2), que é dependente da folga " h ". É esta dependência que faz com que mancais, com este tipo de restrição, tenham uma rigidez teórica do filme até um terço menor do que em mancais com restritores de orifício com rebaixo (tratados a seguir) (9).

As vantagens deste tipo de restritor são a facilidade de confecção e instalação, baixo custo e compacidade (10). Além disso, instabilidade pneumática, característica de restritores de orifício com rebaixo, mal projetados, não ocorre neste tipo de restritores. Este problema será melhor explicado no item seguinte.

2.2.2 Restritores de Orifício com Rebaixo

Aqui, a restrição se deve à área transversal do orifício πa^2 , a qual é independente de h .

Inicialmente, o gás flui através da área do orifício e atinge a pressão do rebaixo. Na extremidade do rebaixo, o gás se expande mais uma vez através de um restritor secundário, dado pela área de cortina πdh , onde uma "vena contracta" ocorre quando o gás entra na folga do mancal (5).

No trabalho realizado por Boffey (8), na folga de projeto, a área de cortina em torno da extremidade do orifício é comparável à área transversal do próprio orifício, o que significa que a restrição é do tipo de compensação em série, e é, assim, dependente do diâmetro do orifício.

Apesar de ter a vantagem de dar uma rigidez maior aos mancais construídos com este tipo de restrição, os restritores de orifício com rebaixo são normalmente associados ao fenômeno da instabilidade pneumática ou martelamento pneumático.

Este fenômeno é relacionado à compressibilidade dos gases e ao conseqüente atraso entre as mudanças na folga do mancal e a resposta a esta mudança através de variações na pressão no rebaixo do orifício. Se o tempo de atraso for muito longo e o volume do rebaixo for muito grande, o aumento de pressão resultante poderá ser excessivo, fazendo com que a folga no mancal seja aumentada. Este aumento na folga irá, conseqüentemente, reduzir a pressão no rebaixo e na folga do mancal, e, assim, a folga entre as superfícies será reduzida. Esta redução vai fazer com que as pressões aumentem e, então, o ciclo se repete (11).

Já no caso dos restritores de orifício sem rebaixo, a configuração anular tem apenas o volume da folga, o qual sempre atingirá as condições apropriadas de pressão ditadas pela folga, pelo diâmetro do orifício e pela pressão de alimentação. Desta maneira, a instabilidade pneumática não pode existir (10).

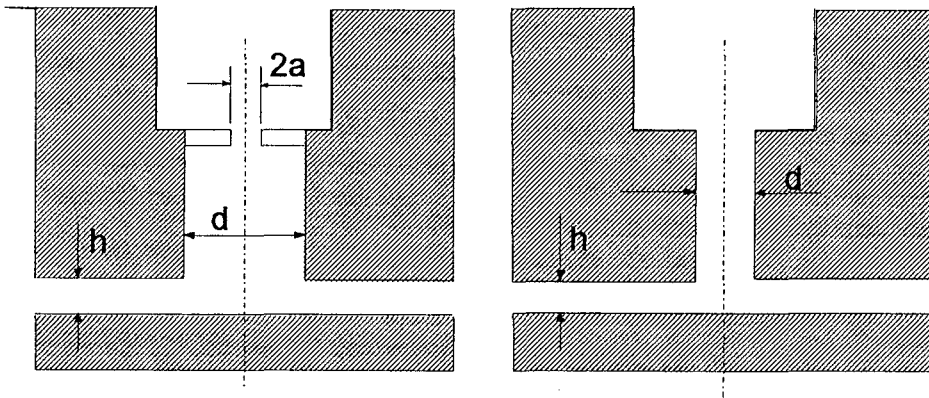


Figura 2.2 - Restritor de orifício com rebaixo (à esquerda) e sem rebaixo (à direita).

2.2.3 Restrição por Ranhuras

Essa restrição é do tipo laminar e proporciona uma capacidade de carga um pouco maior do que a dos restritores de orifício.

As funções do mancal com ranhuras de alimentação são similares às funções dos mancais aerostáticos convencionais, mas suas vantagens devem-se principalmente à presença de uma fonte laminar de alimentação. As dimensões das ranhuras de alimentação são da mesma ordem do que as dimensões da folga do mancal; isto é, o escoamento dentro das ranhuras, e na folga do mancal, é laminar, resultando desta forma em critérios de projeto muito simples, que não envolvem as propriedades do fluido. A capacidade de carga e rigidez são funções apenas das dimensões do

mancal e da pressão do fluido, que permitem ao mancal operar tão bem com fluidos líquidos quanto com gases em uma ampla faixa de pressão, sem mudança de projeto (12).

Um trabalho, apresentado por Araújo (13), trata dos detalhes de fabricação deste tipo de restritores para aplicação em mancais aerostáticos radiais, com 1 e 2 fileiras de ranhuras.

2.2.4 Capilares

São, também, restritores de fluxo laminar, usados em situações onde mancais aerostáticos muito estáveis sejam necessários. Estes apresentam desvantagens construtivas, já que são unidades muito longas, normalmente arranjadas em bobinas.

2.2.5 Restritores Porosos

Este tipo de restritores confere boas características aos mancais, já que apresentam alta capacidade de carga e rigidez. Além disso, restritores porosos podem reduzir alguns efeitos indesejáveis que ocorrem principalmente nos restritores de orifício com rebaixo, notadamente a instabilidade pneumática.

O fluxo através da matriz porosa é puramente viscoso, e é governado pela Lei de Darcy (14).

O problema dos restritores porosos é relativo à sua fabricação. Com os métodos de fabricação atuais, materiais sinterizados não podem ser fabricados com permeabilidade constante (6).

2.2.6 Restritores Flexíveis

Restritores (ou compensadores) flexíveis são aqueles que regulam a vazão de alimentação do mancal em função da carga aplicada. São utilizados com o fim de aumentar a rigidez do mancal aerostático sem, no entanto, manter folgas muito reduzidas (que exigem qualidade de fabricação elevada) (15).

2.3 Tipos de Mancais

A fig. 2.3 mostra os tipos construtivos mais comuns de mancais aerostáticos.

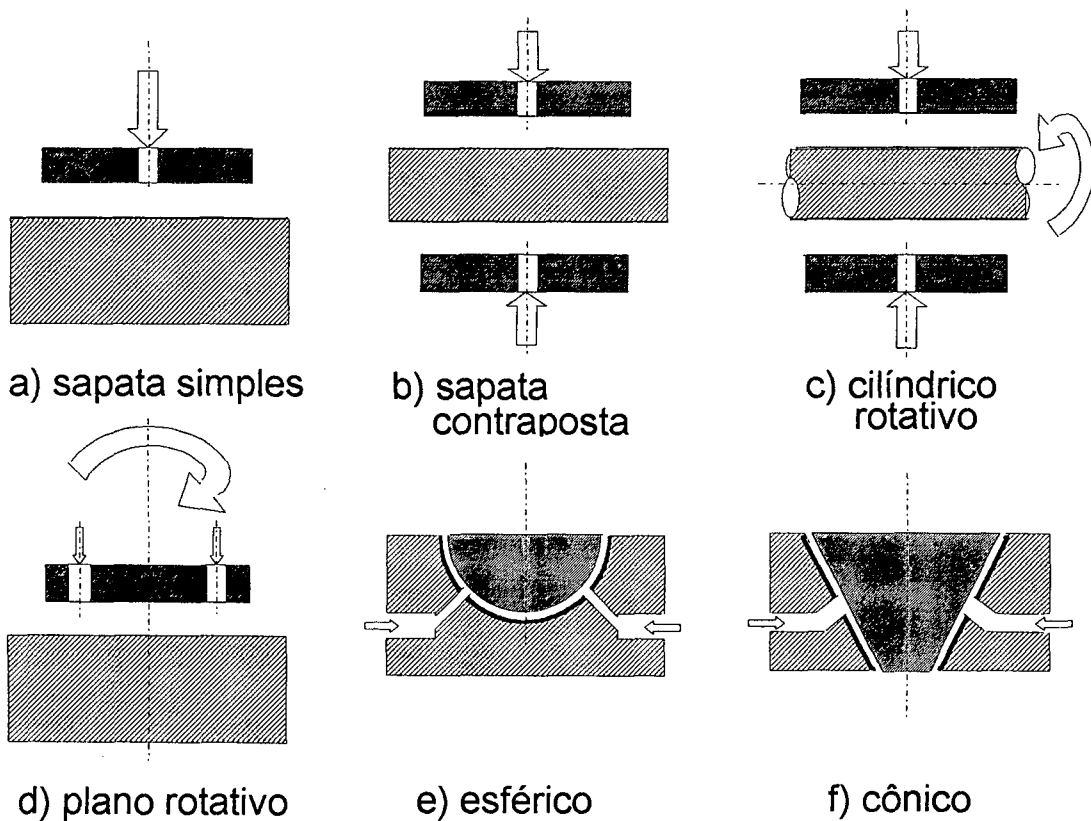


Figura 2.3 - Tipos construtivos de mancais aerostáticos.

(a) Sapata simples

Utilizado para deslocamento linear com carga unidirecional (p. ex. em guias de máquinas de medir por coordenadas).

(b) Sapata contraposta

Também utilizada para deslocamento linear, porém que permite carga bidirecional (p. ex. em guias de máquinas-ferramenta).

(c) Cilíndrico rotativo

Aplicado, quando rotação do eixo é desejada, para suportar carregamento radial.

(d) Plano rotativo

Também para aplicações onde rotação de um dos elementos for desejada, porém, para suportar cargas axiais.

São normalmente combinados com mancais cilíndricos rotativos, de modo a resultar em um mancal que suporte carregamentos em todas direções.

(e) Cônico

Aplicado em sistemas rotativos, para suportar carga axial e radial. Sofre, entretanto, com problemas de desalinhamento entre eixo e estator.

(f) Esféricos

Semelhante ao cônico, porém insensível a problemas de desalinhamento entre eixo e estator. Quando contraposto, suporta cargas em todas direções.

2.4 Propriedades Gerais

Atrito

Por não haver contato direto entre superfícies do mancal, devido à presença do filme de ar, a resistência ao movimento é devida apenas ao atrito viscoso do ar, que é extremamente baixo e sofre pequena variação com a temperatura.

Desgaste

A inexistência de contato entre as superfícies faz com que não haja desgaste. Portanto, vida infinita é esperada em condições normais de operação.

Geração de Calor

Desprezível, mesmo a altas rotações.

Temperatura de Operação

Os gases utilizados como lubrificantes, principalmente o ar, são estáveis numa faixa ampla de temperatura e sua viscosidade é essencialmente constante.

Contaminação do Ambiente

São utilizados em muitos processos industriais pois mancais aerostáticos não expõem lubrificantes nocivos aos processos aos quais se associam (p. ex. têxteis e processamento de alimentos) (5).

Amenização de Erros de Fabricação

A presença do filme de ar faz com que o efeito dos erros geométricos e da rugosidade das superfícies seja amenizado, podendo, desta forma, ser atingida uma precisão de movimento maior do que em mancais de escorregamento, nos quais a elevação de uma superfície sobre as asperezas da outra gera erros de movimento.

Rigidez

Normalmente, mancais aerostáticos apresentam maior rigidez com cargas baixas ou sem carga. Isto, além de proporcionar maior precisão, é muito significativo em aplicações como na retificação, mais especificamente na fase do faiscamento, que poderá assegurar melhor acabamento superficial.

Capacidade de Carga

Menor do que a de mancais de rolamento e de mancais hidrostáticos, porém pode ser aumentada fazendo-se com que a área em que atua a pressão do filme de ar seja maior.

Resolução de Posicionamento

A inexistência de atrito entre as superfícies faz com que este tipo de mancal não apresente "stick-slip". Desta forma, a resolução de posicionamento é virtualmente ilimitada, dependendo apenas do sistema de acionamento e controle utilizado.

Resistência a Vibração e Choque

Apresentam melhor resistência à vibração e ao choque do que todos os outros tipos de mancais, exceto hidrostáticos.

Amortecimento

A existência de um filme fino de ar na folga do mancal dá uma capacidade de amortecimento de baixa a moderada, a este tipo de mancal.

2.5 Aplicações

Mancais aerostáticos têm sido utilizados nas mais diversas áreas e, cada vez mais, novas aplicações são descobertas. Mas, de uma maneira geral, são duas as principais áreas de aplicação: máquinas-ferramentas e sistemas de medição.

2.5.1 Retificação

Uma das aplicações de maior sucesso de mancais aerostáticos tem sido em árvores para retificação. Baixas forças de corte e pequenos carregamentos dinâmicos são particularmente adequados para a aplicação de mancais aerostáticos para cabeçotes porta-rebolo e cabeçotes porta-peça (5).

Melhoras de 3:1 na circularidade da peça são tipicamente produzidas em máquinas que tenham mancais aerostáticos ao invés de mancais a óleo hidrodinâmicos (5).

Outra aplicação é a retificação rotativa. A peça a ser retificada é montada sobre um mancal aerostático, que gira acionado pela própria força de corte gerada na retificação. Assim, além das vantagens oferecidas pelo mancal (p. ex. ausência de "stick-slip", erros de movimentação baixos etc), elimina-se a influência dos erros gerados por um dos três eixos da máquina utilizados na retificação. Na verdade, após o ajuste da profundidade de corte, trabalha-se apenas com um eixo (fig. 2.4). Experiências conduzidas no LMP se mostraram muito promissoras e novos trabalhos serão desenvolvidos.

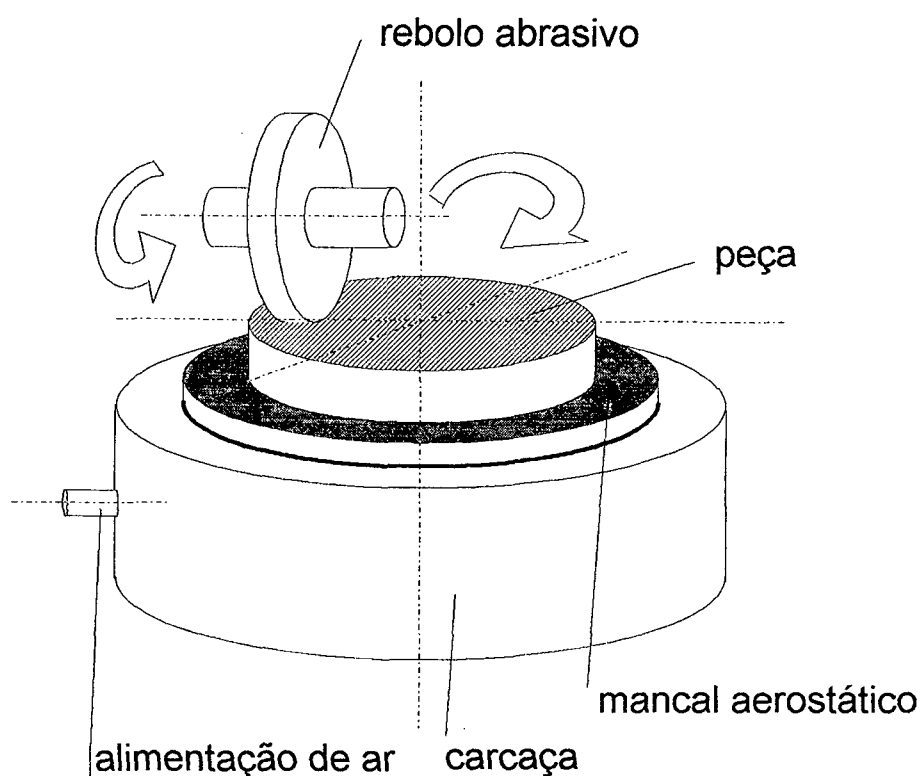


Figura 2.4 - Esquema da retificação rotativa.

Outra grande aplicação é em cabeçotes para retificação interna, os quais podem atingir velocidades altas, acionados por turbina a ar ou motor elétrico integrado, que têm a vantagem de ter um movimento isento de vibração, gerando um melhor acabamento superficial.

2.5.2 Furação

O movimento com baixos erros e os baixos níveis de vibração apresentados por mancais aerostáticos são adequados a cabeçotes de alta rotação, os quais geram bons resultados quando aplicados na furação de pequenos diâmetros (tipicamente 0,3 a 3 mm). Encontram grande aplicação na execução de furos em placas de circuito impresso, na indústria eletrônica.

2.5.3 Torneamento com Ferramenta de Diamante

Mancais aerostáticos são utilizados para equipar máquinas para a fabricação de espelhos metálicos esféricos ou anesféricos, faceamento de discos rígidos para computadores, torneamento de cilindros para fotocopiadoras e torneamento de lentes de contato, entre outras.

2.5.4 Medição de Circularidade

Sistemas de medição são normalmente sujeitos a pequenas forças estáticas e são mantidos em ambiente que deve permanecer livre de contaminação. Estas condições de operação são especialmente adequadas para aplicação de mancais aerostáticos. Máquinas de medir circularidade e mesas rotativas empregando mancais aerostáticos com precisão rotacional de 0,05 μm são fabricadas por várias empresas na Europa, Estados Unidos e Japão. Mesas rotativas são também usadas na produção de cilindros de precisão, semi-esferas e cones, quando usadas como cabeçote porta-peça suplementar em retificação planetária (5).

2.5.5 Máquinas de Medir por Coordenadas

Máquinas de medir por coordenadas devem ter estruturas leves para facilitar movimentos rápidos. Além disso, deve haver atrito zero nos mancais para minimizar deformação na estrutura. A maioria dos mancais aerostáticos usados em máquinas de medir por coordenadas são do tipo sapata simples removível, mantida no lugar por uma esfera roscada que permite que a sapata aerostática se alinhe paralelamente à face. A esfera permite que a sapata tenha três graus de liberdade de rotação, o que assegura um alinhamento preciso. A folga entre as faces é da ordem de 6 a 10 μm para garantir um fluxo de ar modesto (5).

3. PROJETO DO MANCAL

Mancais aerostáticos duplo-esféricos têm sido empregados em muitas aplicações técnicas: Heinzl (Munique), MacKoen (CUPE), Pneumo, Excello, Professional Instruments Co. e outras. No entanto, inexitem dados teóricos que permitam realizar um projeto preciso para aplicações específicas. Neste trabalho, o projeto do mancal se limita ao projeto mecânico, que objetiva a possibilidade de modificação de alguns parâmetros construtivos para se determinar a condição otimizada de funcionamento. Os parâmetros escolhidos para este trabalho foram os seguintes:

- (a) número de restritores;
- (b) número de carreiras de restritores;
- (c) número de entradas de ar por carreira;
- (d) sistema de ajuste da excentricidade axial inicial;
- (e) excentricidade relativa axial.

O projeto do mancal, além de pretender dar condições para a otimização dos parâmetros em questão, busca, também, aproximar-se à condição ideal utilizada na teoria para cálculos de mancais. Isto é devido ao fato de que se quer fornecer dados necessários para as condições de contorno, para uma avaliação matemática mais precisa de mancais aerostáticos esféricos. Esta avaliação matemática, que está sendo desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, não é temática deste trabalho.

Um desenho esquemático do mancal utilizado neste trabalho é mostrado na Fig. 3.1, na qual pode ser observada a configuração tipo duplo-esférico contraposto. As semi-esferas são unidas por um eixo, ao qual estão aparafusadas. Os dois estatores são fixados ao anel externo. A fixação é feita por meio de uma rosca de passo fino que tem como função principal permitir o ajuste da excentricidade axial inicial, ou seja, a posição axial relativa dos centros geométricos da esfera e do estator correspondente, quando a carga aplicada for nula.

Também pode-se observar a existência de três carreiras de restritores com 16, 20 e 24 restritores em cada carreira, respectivamente.

Outro detalhe a ser comentado é o uso de vedações do tipo "O'ring" para isolar os canais de alimentação das três carreiras de restritores.

Cada carreira pode ser alimentada por até duas entradas de ar.

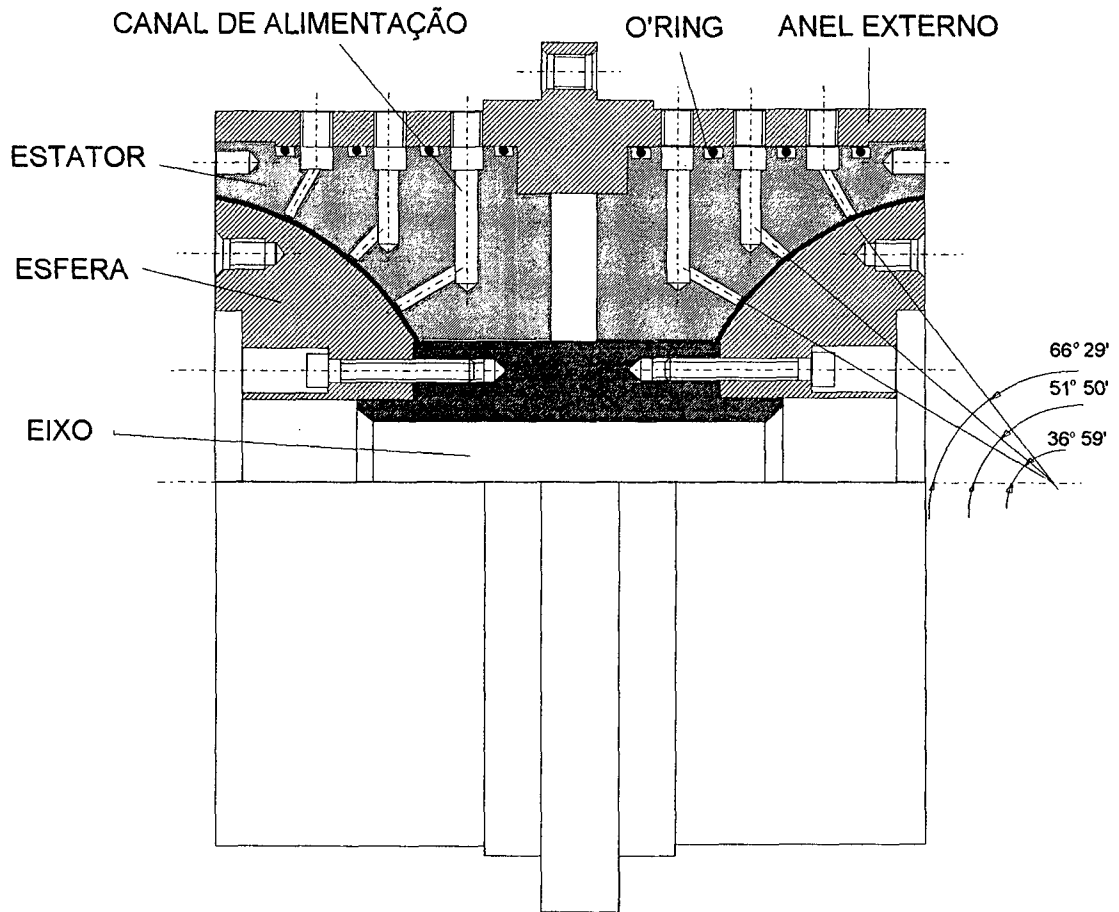


Figura 3.1 - Desenho esquemático do mancal aerostático base deste trabalho.

3.1 Critérios Adotados

3.1.1 Esférico

No primeiro trabalho realizado no LMP com mancais aerostáticos rotativos, foram utilizados mancais esférico-planos, que foram adquiridos da ProtopBleile, Alemanha. Em seguida, o LMP buscou desenvolver este mesmo tipo de mancal, o que resultou em um trabalho de doutoramento (2). Neste trabalho desenvolveu-se uma metodologia de fabricação de semi-esferas que foi posteriormente aprimorada e compilada por Vallejos (3). Desta forma, achou-se conveniente utilizar os trabalhos realizados anteriormente, e adotar a metodologia de fabricação de semi-esferas sugerida.

A falta de máquinas-ferramenta de precisão foi outro fator decisivo para a opção feita. Os mancais esféricos possuem a característica de compensação de desalinhamentos. Assim, erros de fabricação maiores nos componentes (eixo, estatores e anel externo) seriam tolerados, o que era esperado no caso deste mancal.

3.1.2 Dimensões

Um cálculo aproximado da capacidade de carga, baseado nas áreas projetadas em cada direção e na pressão de alimentação, e a experiência acumulada com mancais esféricos levaram a determinar em 100 mm o diâmetro da semi-esfera. Isto resultaria numa capacidade de carga axial em torno de 1500 N, suficiente para as aplicações previstas para este mancal (p.ex. retificação rotativa e torneamento de precisão). Além disso, um programa de computador, existente no LMP, o AEROSTA, que fornece dados de projeto para mancais aerostáticos esféricos, foi consultado. Este programa já havia sido utilizado em outros trabalhos experimentais no LMP sem mostrar, no entanto, que os dados por ele calculados coincidissem com os obtidos experimentalmente.

A Tabela 3.1 apresenta os dados obtidos no programa AEROSTA, para um mancal semelhante ao deste trabalho.

No. Carreiras	No. Restritores	Po-Pa/Pa	Fa [N]	Fr [N]	M [Nm]	Ka [N/ μ m]	Kr [N/ μ m]	K _θ [N/ μ rad]
1	5	6	1181	866	66	105	85	0.45
2	4 - 6	6	1869	1718	118	178	168	0.88
3	4 - 5 - 6	6	3050	2584	184	283	253	1.33
1	10	6	601	458	34	53	43	0.22
2	8 - 12	6	939	868	63	89	84	0.44
3	8 - 10 - 12	6	1541	1327	96	142	127	0.67
1	20	6	412	310	22	28	23	0.12
2	16 - 24	6	639	588	43	47	45	0.23
3	16 - 20 - 24	6	1051	898	65	75	67	0.35
2	16 - 24	4	413	376	27	36	34	0.18

Tabela 3.1 - Valores obtidos com o programa AEROSTA, para um mancal aerostático duplo-esférico, semelhante ao deste trabalho: esferas de raio igual a 50 mm; distância entre centros de 145,2 mm; diâmetro dos restritores de 0,18 mm; rebaixo dos restritores com diâmetro de 1,3 mm e profundidade de 0,1 mm.

Uma análise mais profunda do AEROSTA e uma comparação de resultados serão apresentadas no capítulo 8 - Conclusões.

Para definição das dimensões levou-se em conta, também, a normalização, já que a série de valores R10 para diâmetros foi adotada no LMP. Assim, preferencialmente, os diâmetros dos mancais deveriam ser 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160 e 200 mm.

A disponibilidade de material (bronze TM-23) no estoque do LMP também foi levada em conta. Na verdade, vários pares de semi-esferas já haviam sido usinadas num trabalho anterior. Porém, constatou-se mais tarde, que estas haviam sido geradas com erros maiores do que os admissíveis para este mancal. Isto exigiu um retrabalho para possibilitar sua utilização.

Também nas outras dimensões buscou-se utilizar valores que já haviam sido usados nos trabalhos anteriores. Desta forma, haveria possibilidade de utilização dos dispositivos de ensaio, fixação, usinagem, e outros, para mais este mancal. Isto eliminaria a necessidade de dispositivos

específicos para cada mancal, o que seria antieconômico, improdutivo e desperdiçaria tempo e espaço.

3.1.3 Número de Carreiras de Restritores

A capacidade de carga de um mancal aerostático está diretamente associada ao perfil de pressão no filme de ar que separa as duas superfícies. A pressão é máxima no ponto de entrada de ar, onde se encontra cada restritor, e cai gradativamente até a pressão atmosférica ambiente.

Intuitivamente, é de se presumir que, caso aumente o número de pontos de entrada de ar na folga, o desempenho do mancal seja melhorado. Espera-se, no entanto, um aumento no consumo de ar, mas o que se busca é um ponto onde a relação custo/benefício seja otimizada.

Isto seria um trabalho inédito para mancais esféricos, já que, na literatura pesquisada, só há semelhante consideração para mancais cilíndricos rotativos.

No caso do mancal esférico, diferentemente do que ocorre no cilíndrico rotativo, a contribuição de cada carreira de restritores é diferente em cada direção de carregamento (axial ou radial), o que aumentou ainda mais o interesse para pesquisar este parâmetro.

3.1.4 Número de Restritores por Carreira

Baseado no trabalho de Brungs (16), que sugere um cálculo do número de restritores baseado no perímetro do círculo onde estão posicionados os restritores - e em função de um comprimento onde atuaria a pressão em direção às extremidades do mancal - chegou-se aos seguintes valores: 4, 5 e 6 restritores para as carreiras mais interna, central e mais externa, respectivamente.

Este cálculo, no entanto, não correspondeu muito bem aos valores determinados experimentalmente num trabalho realizado no LMP. Com o aumento do número de restritores obteve-se maior capacidade de carga e rigidez, e determinou-se como número ideal de restritores para uma carreira central algo em torno de 20, para um mancal esférico de 100 mm de diâmetro, semelhante ao deste trabalho.

Com estas informações, decidiu-se analisar também este parâmetro e optou-se por fabricar o mancal inicialmente com 16, 20 e 24 restritores. Desta maneira, haveria a possibilidade de se analisar tanto a influência do número de carreiras quanto do número de restritores, já que experimentos seriam realizados com 5, 4-6, 4-5-6, 10, 8-12, 8-10-12, 20, 16-24 e 16-20-24 restritores, bastando para isso, bloquear a passagem do ar em alguns restritores, conforme a necessidade.

3.1.5 Número de Entradas de Ar por Carreira

A análise de um catálogo de um fabricante de mancais aerostáticos dos Estados Unidos (17) despertou a idéia de verificar se a perda de carga dentro do canal de alimentação seria considerável ou não. Teoricamente, sabia-se que não deveria ser, mas como seria muito simples analisar este parâmetro, bastando para isso fazer uma outra entrada de ar a 180°, decidiu-se testá-lo.

3.1.6 Folga

A experiência acumulada dizia que mancais aerostáticos esféricos funcionavam dentro de uma faixa bastante ampla da folga. Seu desempenho é melhorado, porém somente à medida que a folga diminui, pois há um aumento de rigidez e a vazão de ar é reduzida.

No entanto, sabia-se que o processo de fabricação a ser adotado apresentava limitações e a folga executável estaria na faixa de 15 a 20 μm , um valor razoável. Brungs (16) trabalhou com folgas em torno de 8 μm para um mancal esférico semelhante.

3.1.7 Diâmetro dos Restritores

Devido à dificuldade de fabricação dos restritores, por ser um processo moroso, decidiu-se não variar este parâmetro, fixando-o num diâmetro de 0,18 mm. Este valor respeita a faixa de diâmetros de restritores utilizada para mancais aerostáticos, que fica entre 0,1 e 0,25 mm.

3.1.8 Ajuste da Folga

Devido à não disponibilidade de equipamentos com a precisão adequada, os erros de fabricação esperados nos componentes deste mancal eram razoavelmente altos. Assim, a distância entre os centros das esferas poderia ser igual, maior ou menor do que a distância entre os centros dos estatores. Só que seria praticamente impossível fazer uma previsão, principalmente quando variações na folga na ordem de no máximo $\pm 1.0 \mu\text{m}$, seriam desejáveis.

No projeto do mancal foram previstas roscas finas no anel externo que permitiam ajustar a posição axial dos estatores em relação ao eixo das semi-esferas do mancal. Adotando uma rosca com passo de 0,5 mm tem-se um deslocamento axial de $1,39 \mu\text{m}$ por grau. Para uma ferramenta com um braço de 150 mm, um deslocamento da extremidade da haste por 10 mm corresponde a, aproximadamente, um deslocamento axial de $5 \mu\text{m}$ do estator. Como a folga do mancal se distribui igualmente para os dois lados, $5 \mu\text{m}$ num estator corresponde a $2,5 \mu\text{m}$ de variação na folga axial.

3.1.9 O'ring

O elementos de vedação adotados para isolar os canais de alimentação das três carreiras foram os "O'rings", por serem facilmente obteníveis, baratos e teoricamente eficientes.

Desejava-se este isolamento para que testes com uma, duas e três carreiras pudessem ser realizados.

3.1.10 Furos Roscados

Os furos roscados existentes na face de montagem das esferas foram projetados visando-se a fixação de flanges, polias e outros dispositivos necessários à utilização do mancal para alguma aplicação específica.

Estes foram os aspectos mais relevantes relativos ao projeto do mancal. Na seqüência, serão apresentados detalhes de fabricação.

4. PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Neste capítulo buscar-se-á explorar alguns aspectos referentes à fabricação do mancal utilizado.

Rocha (2) descreve em detalhes o processo de fabricação de mancais aerostáticos esféricos. Alguns pontos, no entanto, não foram abordados ou merecem ser salientados. É o que será apresentado a seguir.

4.1 As Semi-esferas

As semi-esferas foram geradas por torneamento, pela técnica da superposição de movimentos circulares, descrita por Vallejos (3). Os erros geométricos gerados nesta etapa foram na ordem de 0,01 a 0,02 mm, medidos com instrumentos de medição convencionais.

Para corrigir o erro de paralelismo entre as duas faces de cada semi-esfera, utilizou-se a retificação plana. Apesar de ser bronze o material das semi-esferas, a retificação pôde ser realizada com sucesso, e o erro de paralelismo obtido foi menor do que 7 μm .

A esfericidade foi melhorada por lapidação. A técnica utilizada foi a mesma de lapidação de lentes e espelhos esféricos (Figura 4.1). A esfera tem um movimento de rotação e um copo de lapidação desliza aleatoriamente pela superfície, espalhando a pasta abrasiva de SiC e executando a lapidação. A granulometria da pasta abrasiva para desbaste era de 1000 mesh, e para acabamento foi usada pasta de diamante de 6 μm . Com este processo, o erro de esfericidade caiu para 2 μm , medido numa Máquina de Medir por Coordenadas (MMC), da marca Zeiss.

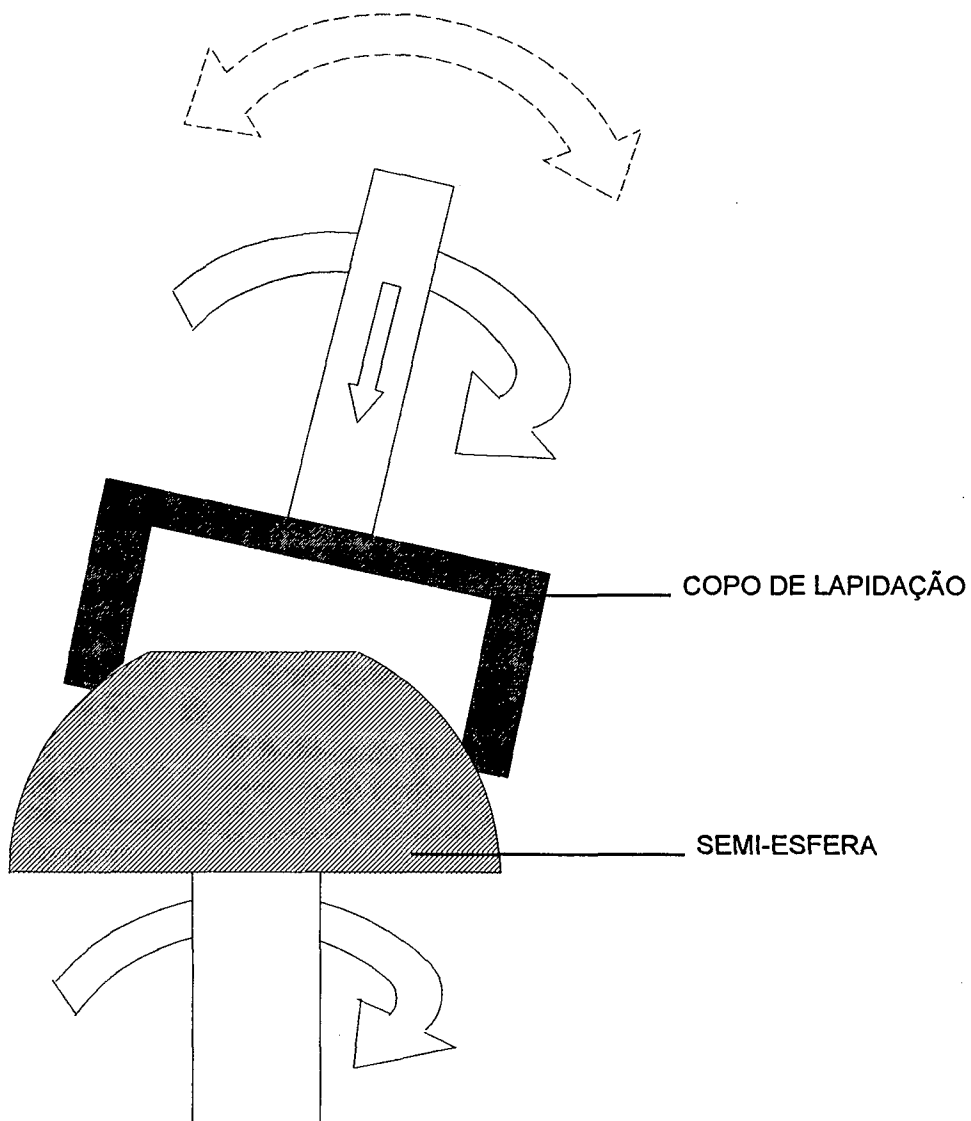


Figura 4.1 - Esquema do processo de lapidação das semi-esferas.

Outra parte crítica da esfera era o furo central que deveria estar perpendicular às faces e coaxial ao eixo da semi-esfera. Tomou-se a precaução de usinar todas as superfícies da semi-esfera, tomando-se como base este furo, garantiram-se assim as tolerâncias estabelecidas.

4.2 A Rosca de Ajuste da Excentricidade Axial Inicial

Fabricar uma rosca M120x0,5 não é uma tarefa muito simples. Rosquear as peças é mais difícil ainda. Isto ocorre porque o espaço livre entre a cabeça e o pé do flanco é muito pequeno. Qualquer micro-rebarba ou sujeira faz com que emperre. Além disso, a rosca foi executada por um comprimento de 6 mm, o que resulta em 12 voltas. A linha de contato, ou melhor, a área de contato (devido à facilidade de deformação do bronze), portanto, é aumentada consideravelmente, o que intensifica a possibilidade de trancamento.

As roscas foram lapidadas com pasta abrasiva de SiC de granulometria de 1000 mesh. Isto deu resultados muito bons, sem os quais não seria possível montar o conjunto.

4.3 A Técnica de Moldagem em Resina

A idéia de se utilizar resina na fabricação de mancais aerostáticos surgiu na Alemanha. Foi então trazida para o Brasil, mais especificamente ao LMP, onde se desenvolveu uma técnica de moldagem com resina isoftálmica. Esta técnica é totalmente inédita, pois não emprega os elementos do modelo que gerou a idéia.

Para ilustrar, no LMP, os restritores são moldados ao mesmo tempo e na mesma massa de resina, que recebe a forma da semi-esfera. No modelo alemão, os restritores são bujões de bronze.

A resina utilizada na Alemanha é da marca Moglice que é muito mais cara e difícil de obter do que a resina isoftálmica, disponível a preços módicos. A resina isoftálmica recebe uma carga de talco ou pó de quartzo de granulometria menor que 43 μm , que lhe confere melhores propriedades mecânicas. A vantagem da resina Moglice, em contrapartida, é sua homogeneidade e a facilidade de ser trabalhada.

Antes da moldagem propriamente dita, há uma etapa de preparação do estator e da semi-esfera. A esfera deve estar lapidada e com o menor erro de esfericidade possível, já que este terá que ser eliminado por uma lapidação posterior. Quanto menores os erros do modelo (semi-esfera), menor será o erro na superfície moldada (estator) e mais rápida será a lapidação para

ajuste da folga.

A esfera recebe uma camada fina e uniforme de desmoldante e é polida com flanela para que o desmoldante seja mais eficaz.

Um fio de náilon, de 0,18 mm de diâmetro, é utilizado como modelo para execução dos restritores, que serão também moldados. Na superfície esférica interna do estator, fios de cobre, de diâmetro igual à espessura de resina desejada, são colocados nos círculos correspondentes a cada uma das três carreiras. O fio de náilon passa pelo canal de alimentação de ar até chegar à superfície esférica. Neste ponto, o fio de cobre está posicionado. O náilon contorna o cobre e retorna pelo mesmo canal de alimentação (Figura 4.2). Este processo é repetido para todos os furos nas três carreiras.

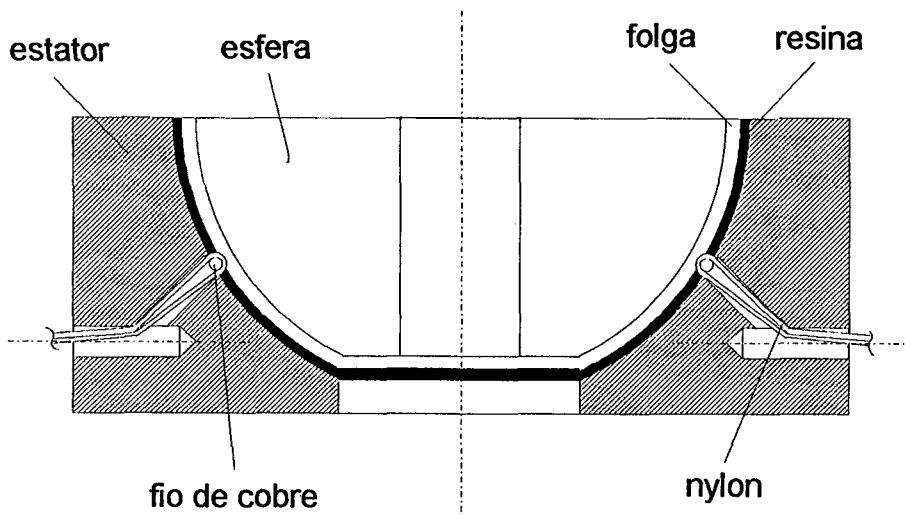


Figura 4.2 - Esquema do processo de "costura" do fio de náilon para confecção dos restritores.

O fio de náilon, que também recebeu uma camada de desmoldante é, normalmente, facilmente retirado após a moldagem, salvo exceções. Nestes casos, só uma nova moldagem

resolverá o problema.

Depois de costurado, o estator é montado no dispositivo de moldagem, que garante a concentricidade da superfície esférica, moldada com um diâmetro guia do estator. Após, é feita a moldagem, que garante uma camada de resina de aproximadamente 1 mm entre estator e esfera.

O tempo de espera antes da desmoldagem é de, no mínimo, 24 h, sendo aconselhável esperar 48 h. A desmoldagem é feita em prensa manual, pois a força necessária para cisalhar o desmoldante é razoavelmente alta, já que a área da superfície moldada é grande.

Após a desmoldagem, a limpeza das peças é feita e o próximo passo será o ajuste da folga.

4.4 Ajuste da Folga

A técnica de moldagem em resina fornece como resultado duas superfícies esféricas quase idênticas. As únicas diferenças são causadas pela variação da espessura do filme de desmoldante e pela contração da resina. Estes dois fatores geram erros de forma que devem ser corrigidos na superfície moldada. O processo utilizado para a correção destes erros é a lapidação manual com pasta abrasiva de SiC de granulometria de 1000 mesh, misturada com óleo fino, onde esfera e estator são lapidados um contra o outro.

No decorrer da lapidação pode-se observar a remoção das partes mais salientes (picos) na resina.

A distância entre picos e vales é grande comparada com a quantidade de material removido pela lapidação. À medida que os picos são removidos, a área de contato é aumentada e a correção dos erros é mais lenta. Há pontos, principalmente próximo ao equador da semi-esfera, onde se torna quase impossível a correção dos erros de forma. É esta região que terá maior influência no erro de esfericidade medido e no desempenho do mancal.

O problema dos erros de moldagem está ilustrado nas figuras 4.3 e 4.4. Após a moldagem, antes da lapidação, vales e picos podem ser claramente vistos na superfície da resina a olho nu. Nos pólos estes defeitos de moldagem são corrigidos facilmente, pois aumentando-se o

tempo de lapidação da semi-esfera contra o estator, obtém-se uma remoção de material no sentido axial. No equador, os defeitos de moldagem só são corrigidos até um certo nível definido pelo tamanho de grão empregado na lapidação. Mesmo aumentando o tempo de lapidação, a correção dos defeitos de moldagem equatorial não é total. O aumento da granulometria leva a um aumento da remoção radial de material, de forma que tanto os defeitos nos pólos como também no equador possam ser corrigidos. No entanto, um aumento da granulometria do abrasivo leva também a um aumento da folga entre as duas superfícies, para a situação de centros coincidentes ($\epsilon_a = \epsilon_r = 0$).

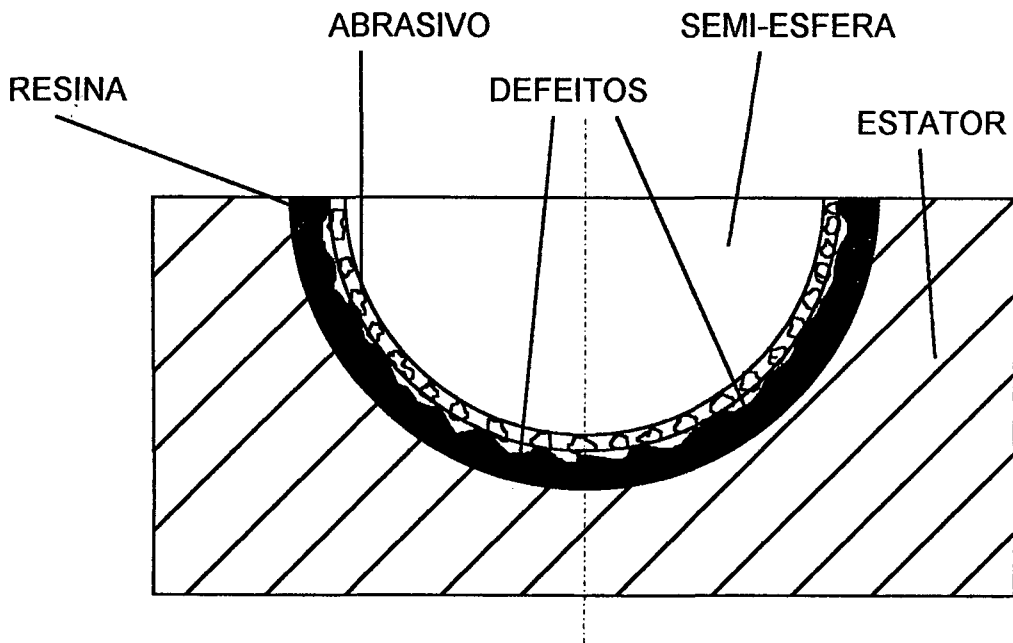


Figura 4.3 - Esquema dos defeitos de moldagem na resina, antes da lapidação.

A lapidação, para o ajuste da folga, pode ser feita tanto antes quanto depois da retirada dos fios de náilon. Se for feita depois, no entanto, só deve ser realizada se houver suprimento de ar no mancal para que os restritores não sejam obstruídos.

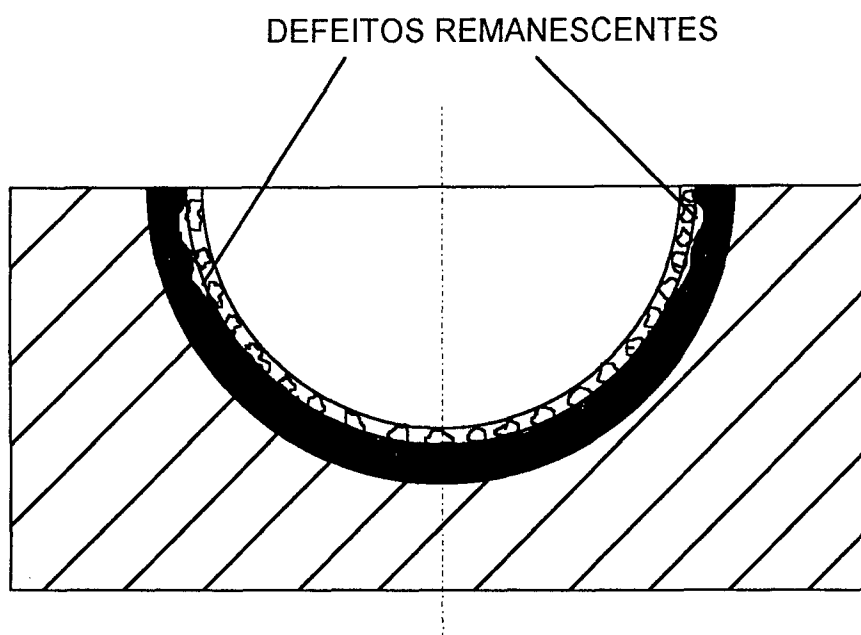


Figura 4.4 - Esquema dos defeitos de moldagem remanescentes, após a lapidação.

Duas etapas de lapidação seguidas de medição em Máquina de Medir por Coordenadas (Zeiss) dos erros de esfericidade, foram realizadas. Os erros mínimo/máximo encontrados foram os seguintes:

* semi-esfera externa (bronze): 1,2 / 2,3 μm

* semi-esfera interna (resina): 3,0 / 6,8 μm .

Estes foram os aspectos de fabricação que mereceram destaque na construção do mancal, utilizado neste trabalho. A seguir, serão tecidos comentários sobre a montagem e os ajustes finais para o seu funcionamento.

5. MONTAGEM E AJUSTES

O objetivo deste capítulo é chamar a atenção para aspectos normalmente insignificantes face à mecânica convencional, mas que se tornam importantes quando se trabalha na escala micrométrica, como é o caso dos mancais aerostáticos.

5.1 Ajuste da Excentricidade Axial Inicial (ϵ_{ao})

O sistema de rosca fina, adotado para o ajuste da excentricidade axial inicial (descrito no Cap. 3), proporcionaria, segundo o projeto, uma resolução de variação da excentricidade axial de $2,5 \mu\text{m}$. Na prática, o seu comportamento foi um pouco diferente.

Um problema surgido foi a resistência oferecida ao roscamento do estator no anel externo, quando os "O'rings" eram colocados, segundo o projeto. Como quatro "O'rings" eram utilizados e doze voltas necessárias para o roscamento completo, o atrito entre a borracha dos "O'rings" e o bronze da superfície interna do anel externo exigia uma força muito alta para ser vencido. A solução utilizada foi melhorar o acabamento da superfície de bronze através de lixamento com lixa d'água (grana 400 e 600), para facilitar a montagem. Além disso, os "O'rings" foram lubrificados com vaselina.

Após este ajuste, o sistema pôde ser montado e testado. A resolução efetiva de ajuste da excentricidade foi ainda menor do que $2,5 \mu\text{m}$. Com o cuidado devido, pôde-se obter uma resolução de $1 \mu\text{m}$, sem maiores dificuldades.

5.2 Limpeza das Peças

Este fator é bastante crítico quando se trabalha na escala micrométrica, pois facilmente encontram-se partículas de sujeira com algumas dezenas de micrometros de diâmetro, mesmo em ambientes laboratoriais.

Todas as peças do mancal foram limpas em um sistema de ultra-som, no qual eram imersas com detergente líquido solúvel em água. A secagem foi feita com ar comprimido seco. As superfícies mais críticas, como as superfícies esféricas, por exemplo, eram limpas antes da

montagem com algodão e benzina retificada. A resina também foi limpa com benzina sem apresentar nenhum problema.

Cuidados maiores não são necessários, pois a parte mais crítica do mancal - a folga entre as superfícies esféricas - é da ordem de 15 a 20 μm . No caso de mancais com folgas na faixa de 2 a 5 μm , os cuidados têm de ser redobrados e, normalmente, a montagem é feita em salas limpas ou mesmo em cápsulas limpas. Estas são microambientes limpos que se tornaram uma solução mais econômica (custo de manutenção mais baixo) para a montagem ou usinagem de componentes de mecânica de precisão (17).

5.3 Batimento Axial do Conjunto Eixo/Esferas

Este foi um caso onde os erros de fabricação puderam ser quase que neutralizados. Trata-se da montagem do conjunto eixo/esferas.

A qualidade das peças fabricadas seria responsável pelo erro final de paralelismo entre as faces de montagem das duas semi-esferas após a montagem do conjunto. Em cada semi-esfera, o erro de paralelismo entre as faces era de 7 μm . O batimento axial da face de montagem do eixo era de 10 μm . O erro final, devido à combinação dos erros de cada componente poderia, atingir até 64 μm .

Para diminuir este problema, montou-se o conjunto de maneira que os erros se compensassem. Buscou-se a posição relativa ótima entre as peças e obteve-se um erro final de paralelismo entre faces de 6,6 μm .

No caso do mancal esférico, este erro não compromete seu desempenho, e ainda pode ser corrigido por usinagem com o mancal em funcionamento. O que se quer salientar, entretanto, é a existência de mecanismos para a ajustagem de sistemas de mecânica de precisão que permitam a redução ou até a eliminação dos erros gerados na fabricação ou montagem (18).

Tomando-se todos os cuidados necessários e, desde que se resolvam os problemas encontrados, pôde-se colocar o mancal em funcionamento. Exceto pelos pontos destacados neste

capítulo, tudo funcionou segundo as expectativas do projeto. O passo seguinte seria preparar o mancal e os dispositivos para a realização dos experimentos, o que será descrito no próximo capítulo.

6. OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

6.1 Aspectos Gerais

Os ensaios experimentais são uma parte muito importante deste trabalho, porque vão fornecer dados para a avaliação do desempenho do mancal aerostático desenvolvido. A forma de aplicação da carga, o sistema de medição (SM) adotado, os erros envolvidos, e outros fatores são dignos de menção; por isso mereceram o devido aprofundamento neste capítulo.

A capacidade de carga de um mancal aerostático e sua rigidez estática são parâmetros fundamentais (se não suficientes) para caracterizar o seu comportamento. A capacidade de carga é relacionada com o deslocamento do centro geométrico da semi-esfera, relativamente ao do estator respectivo. Partindo-se, então, de uma situação inicial, onde os centros geométricos do estator e da semi-esfera coincidam ($\epsilon = 0$), aplica-se uma carga e obtém-se como resultado a alteração desta situação de concentricidade, devido à compressão do filme de ar. À medida em que uma carga maior for aplicada, maior será a diminuição do filme de ar, ou seja, $\epsilon > 0$. O ponto de carga máxima ocorre quando o filme de ar preenche apenas os vales da rugosidade e permite que os picos das duas superfícies entrem em contato. Esta é a situação de colapso do mancal que deve ser evitada durante a utilização de mancais aerostáticos, pois partículas das superfícies podem se desprender, causando danos às mesmas e podendo levar ao bloqueio da rotação.

A rigidez é a taxa de variação de ϵ com a carga aplicada, e pode ser obtida facilmente através da derivação da curva Força x ϵ .

Para que as informações sobre o mancal fossem completas, realizaram-se experimentos com aplicação de carga axial, radial e de momento. A direção axial corresponde ao eixo de giro do mancal. Perpendicular àquela está a direção radial, ou seja, a direção do raio da face das semi-esferas. A carga de momento foi aplicada através de duas forças radiais de sentidos opostos, que geravam um binário de forças em torno do ponto médio entre as faces das semi-esferas, sobre o eixo axial.

Assim, trabalhou-se com as seguintes variáveis:

* Carga axial => ϵ_a , F_a e K_a

* Carga radial => ϵ_r , F_r e K_r

* Carga de momento => θ , M e K_0

Estas variáveis representam a excentricidade, a carga e a rigidez para a direção axial e radial; e o deslocamento angular, o momento e a rigidez angular, no caso da carga de momento.

6.2 Preparação do Mancal

Antes de cada experimento, o mancal foi ajustado e preparado para que fosse possível avaliar parâmetros específicos, tais como: número de entradas de ar por carreira; número de carreiras de restritores; pressão de alimentação; número de restritores e excentricidade relativa axial inicial.

O controle do número de entradas de ar era facilmente realizado pela montagem de um bico de ar extra num dos furos de entrada de ar previstos no projeto, que permaneciam vedados ou não, conforme a necessidade.

O número de carreiras de restritores era selecionado de acordo com a necessidade. Isto era feito através da simples conexão da tubulação de ar comprimido nas entradas de ar correspondentes às carreiras de restritores a serem utilizadas no teste.

O procedimento para a regulação do número de restritores a serem utilizados era um pouco mais complexo. O método mais viável encontrado consistia em vedar com silicone os restritores que não seriam utilizados no teste. Este tipo de vedação garantia a estanqueidade dos restritores, porém apresentava um inconveniente: não havia a possibilidade de reverter o processo. Desta forma, os primeiros testes realizados apresentavam todos os restritores desobstruídos, ou seja, 16-20-24 restritores. Na segunda etapa dos testes, metade dos restritores foi obstruída, restando 8-10-12 restritores. Na última etapa, a metade dos restritores restantes foi obstruída, assim os testes foram realizados com 4-5-6 restritores. Apesar deste método de

vedação ter sido bastante eficiente, impediu que alguns testes fossem refeitos, já que o resultado dos mesmos só foi conhecido após o processamento dos dados, após a finalização de todos os testes. Isto prejudicou em parte a constatação do comportamento real do mancal em certas condições.

A regulagem da pressão de alimentação não apresentou problemas, já que era feita diretamente na rede de ar comprimido, através de uma válvula reguladora de pressão, posicionada antes da entrada de ar do mancal.

Uma análise mais detalhada será feita para o ajuste da excentricidade relativa axial inicial.

Por excentricidade deve-se entender a posição relativa entre os centros geométricos da semi-esfera e do estator. Se a excentricidade ocorrer na direção axial, tem-se a excentricidade axial. Quando a excentricidade, que tem dimensão de comprimento, é dividida pela folga "ho", obtém-se a excentricidade relativa, que é um parâmetro adimensional.

A excentricidade relativa indica o quanto a semi-esfera e o estator estão excêntricos, com relação à folga. Assim, se a excentricidade relativa for zero, é porque o conjunto está concêntrico; se for igual a 0,5, é porque o deslocamento entre centros é de 50% do valor da folga, e assim por diante, até 1,0, quando a excentricidade é de 100% da folga e ocorre o contato entre estator e semi-esfera. Vale lembrar que "ho" é a folga entre as duas superfícies quando a excentricidade é zero, ou seja, é igual à diferença de raio entre estator e semi-esfera.

Já a excentricidade relativa axial inicial é o valor da excentricidade relativa axial quando a carga no mancal é nula, ou seja, é o valor que é ajustado na preparação do mancal para os testes. Este ajuste é feito através de rosca fina, e é descrito em detalhes no capítulo 4 (item 4.4) e no capítulo 5 (item 5.1).

É importante, neste momento, analisar a forma da fenda de ar entre estator e semi-esfera para diferentes condições de excentricidade axial e radial. A figura 6.1 ilustra os comentários que serão tecidos.

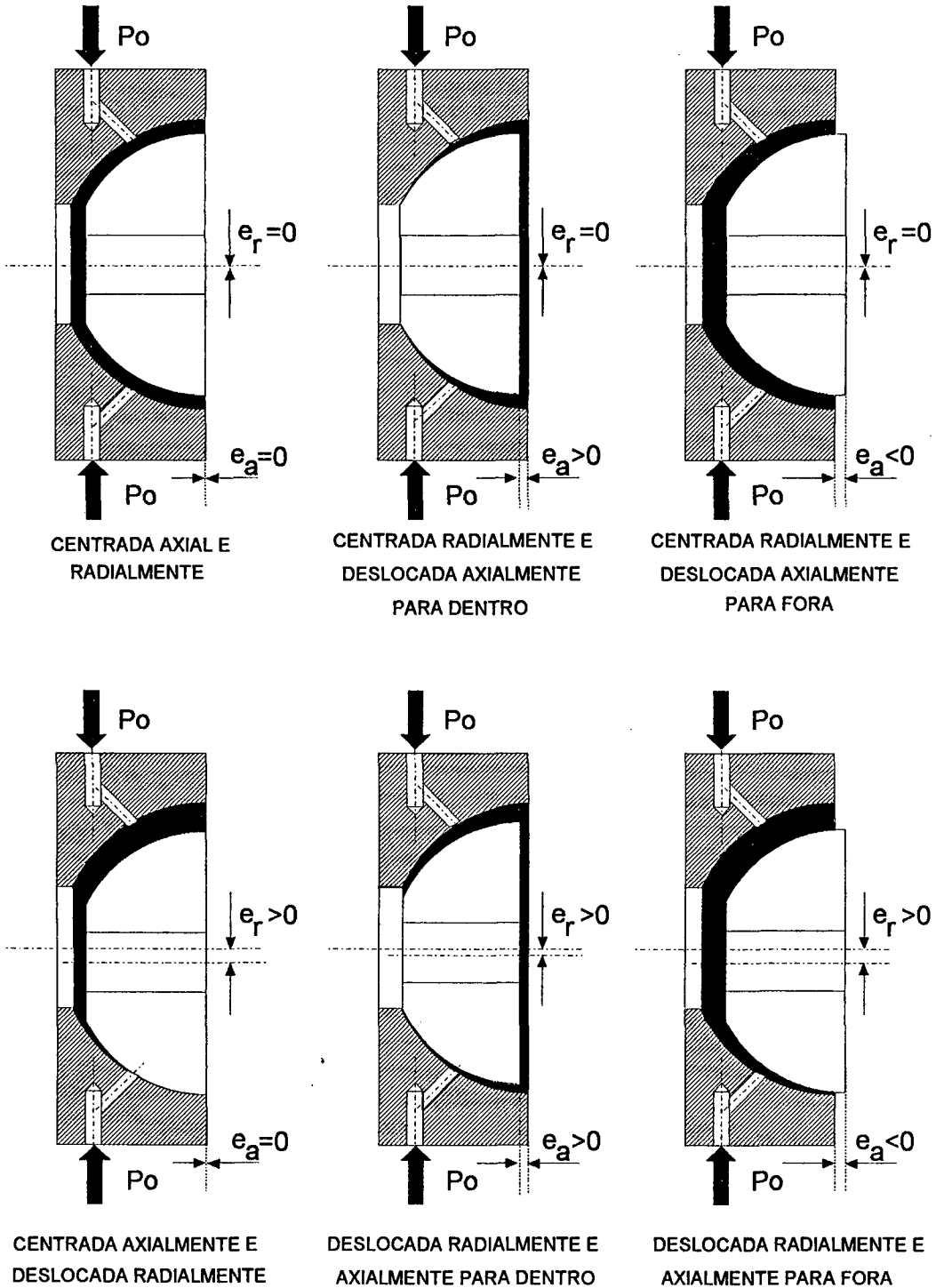


Figura 6.1 - Condição da fenda de ar em função da posição relativa entre semi-esfera e estator.

Na condição de excentricidade relativa axial (ϵ_a) e radial (ϵ_r) iguais a zero, tem-se uma

fenda uniforme, de espessura "ho", que apresenta uma condição de escoamento simétrica, e que pode ser modelada matematicamente sem apresentar maiores complexidades. Nesta condição o fluxo de ar para o ambiente ocorre tanto em direção ao pólo, quanto em direção ao equador.

Se ϵ_r for mantida igual a zero, e se ϵ_a tornar-se maior do que zero, de modo a aproximar as duas superfícies esféricas, verifica-se que a fenda diminui de espessura na região próxima ao pólo. Pouca variação, no entanto, ocorre na região próxima ao equador. Pode-se observar, na figura 6.1, que há uma maior resistência ao escoamento do ar na região do pólo. Este fato altera o fluxo de ar dentro da fenda e, conseqüentemente, afeta o perfil de pressão que responderá pela capacidade de carga e pela rigidez do mancal. Além disso, o modelamento matemático nesta condição torna-se mais complexo.

No caso de $\epsilon_r = 0$ e $\epsilon_a < 0$, a situação é invertida. A fenda de ar terá maior espessura na região do pólo, e menor no equador. Assim, a restrição ao fluxo de ar ocorrerá não no pólo, mas no equador do mancal. O perfil de pressão será diferente do que nas duas condições anteriores, fazendo com que o mancal apresente um comportamento também diferenciado quando solicitado pelos carregamentos. O modelamento matemático nesta condição também é bastante complexo. Convém salientar que o mancal pode passar pelas três condições citadas, ao longo de um único experimento, desde que a excentricidade relativa axial inicial seja negativa.

Outra condição a ser analisada é aquela onde tem-se $\epsilon_a = 0$ e $\epsilon_r > 0$. A fenda de ar tem um perfil totalmente assimétrico, e sua espessura é menor na direção do deslocamento dos centros, e maior na região diametralmente oposta. Isto causa um comportamento do fluxo de ar difícil de ser descrito matematicamente, e, até mesmo, difícil de ser previsto intuitivamente. Este comportamento talvez explique a baixa capacidade de carga radial deste tipo de mancal aerostático.

Pode-se afirmar que a condição de escoamento do ar nas duas outras condições ($\epsilon_a > 0$ e $\epsilon_r > 0$; $\epsilon_a < 0$ e $\epsilon_r > 0$) é tão indefinida quanto, ou até mais, do que nas condições anteriores. Isto causa dificuldades enormes para se prever o comportamento do mancal em tais condições, e até para se julgar a confiabilidade dos dados obtidos. Além disso, um trabalho de validação com

dados experimentais de teorias que descrevam o comportamento do perfil de pressão nesta condições, fica extremamente dificultado em função das não linearidades dos elementos envolvidos.

Apesar de tudo, o trabalho experimental é um passo inicial no caminho da descoberta e do entendimento do funcionamento de mancais aerostáticos esféricos, e será, com certeza, valioso para trabalhos futuros nesta área. Por isso o empenho em preparar o mancal adequadamente, para se obter dados úteis e confiáveis.

6.3 Montagem dos Experimentos

A técnica adotada por Brungs (16) foi a base da montagem dos experimentos deste trabalho. As cargas foram todas aplicadas diretamente através de massas-padrão, sem mecanismos de amplificação. Desta forma, os erros na força aplicada seriam mínimos e haveria a possibilidade de verificar o ponto de travamento do mancal, o qual determinaria a carga máxima. Um esquema da forma de aplicação das cargas e da fixação do mancal nos experimentos é mostrado nas Figuras 6.2, 6.3 e 6.4.

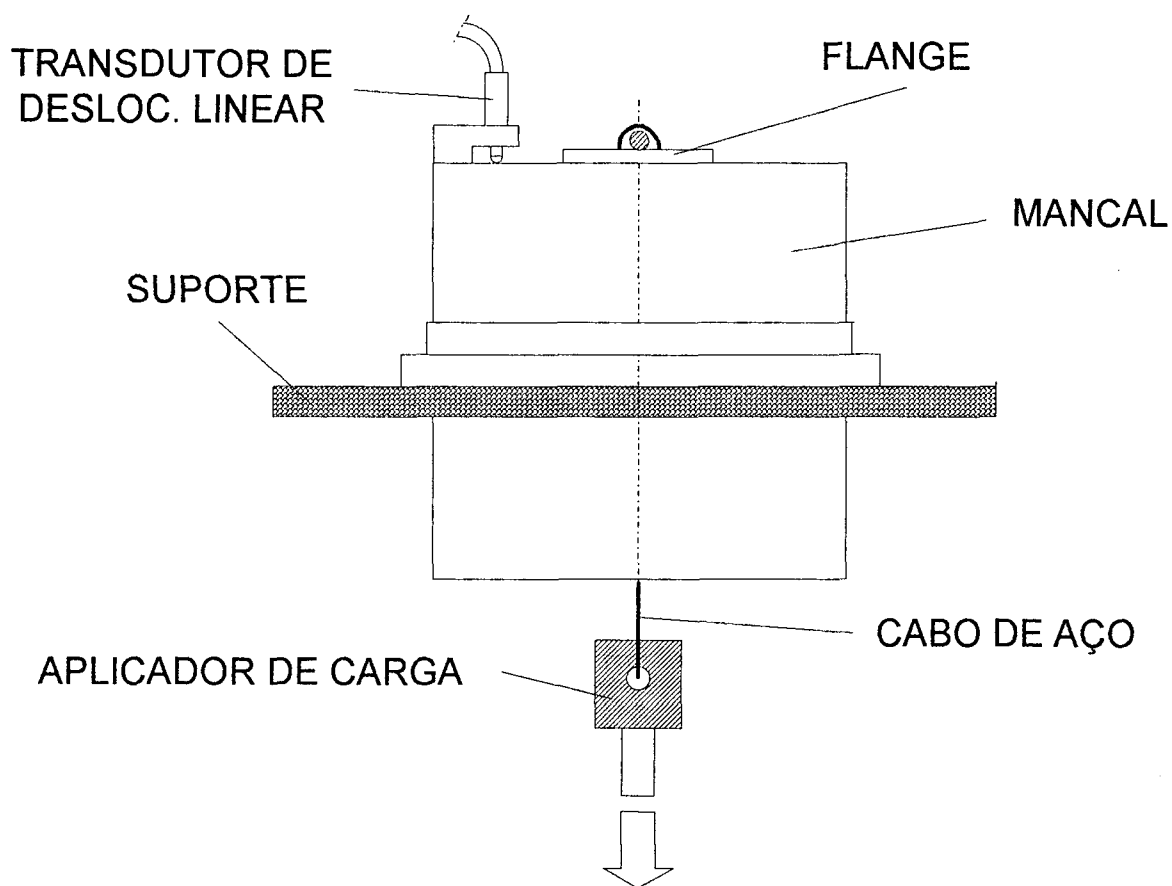


Figura 6.2 - Esquema do ensaio de carga axial.

6.4 Análise de Erros

As massas-padrão utilizadas foram de 5 e 10 kg e apresentavam um incerteza de medição (I_m) de $\pm 0,1$ g. O erro sistemático (E_s) máximo existente era de $-1,5\%$, sendo $-0,1\%$ o E_s médio.

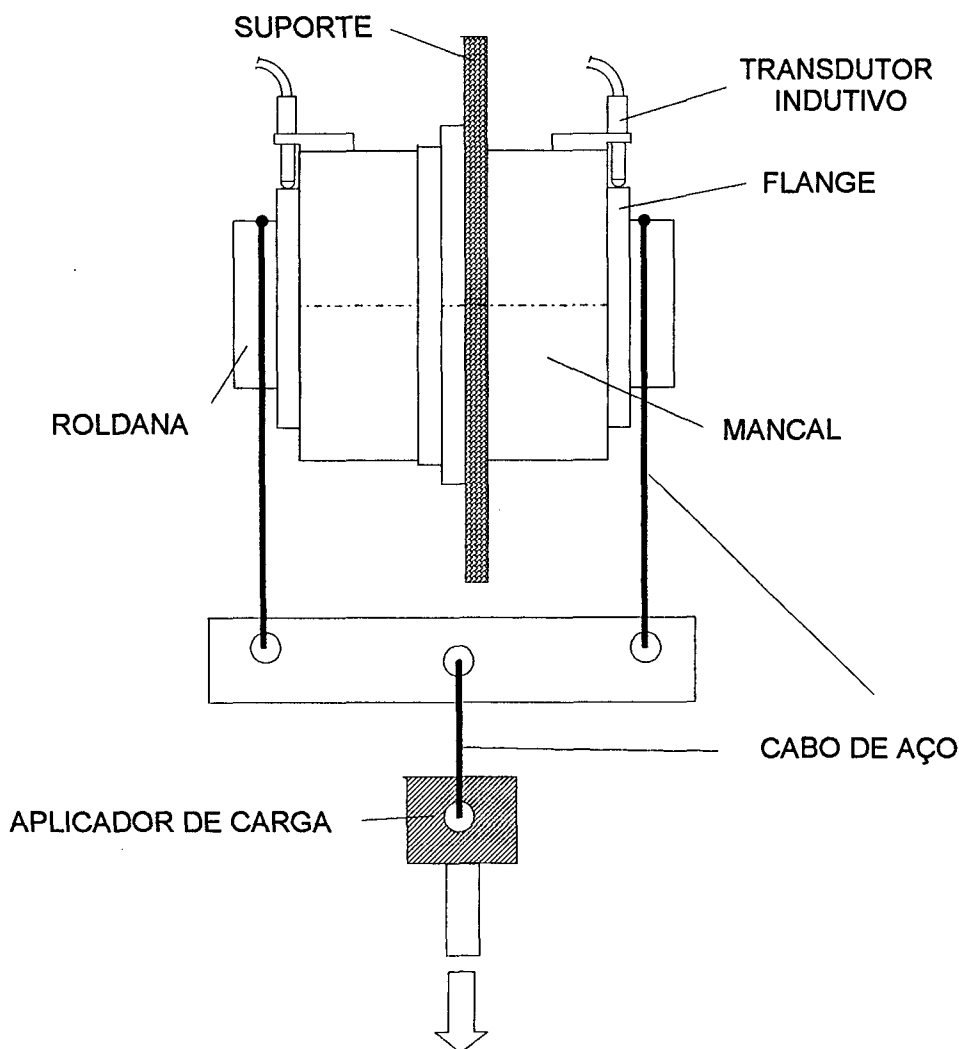


Figura 6.3 - Esquema do ensaio de carga radial.

Para a medição do deslocamento da semi-esfera em relação ao estator, foram utilizados dois transdutores indutivos da marca KS com suas respectivas unidades de tratamento de sinais (UTS). Estes foram fixados no estator, o que tornou a medição insensível às deformações dos dispositivos de fixação do mancal. A resolução do SM era de $0,1 \mu\text{m}$, com divisão de escala de $1 \mu\text{m}$, numa faixa de operação de $\pm 25,0 \mu\text{m}$. Os dois transdutores, com respectivas UTS's, foram calibrados após a execução dos experimentos que apresentaram uma curva de erro que permitiu a compensação do erro sistemático do SM, durante o processamento dos dados.

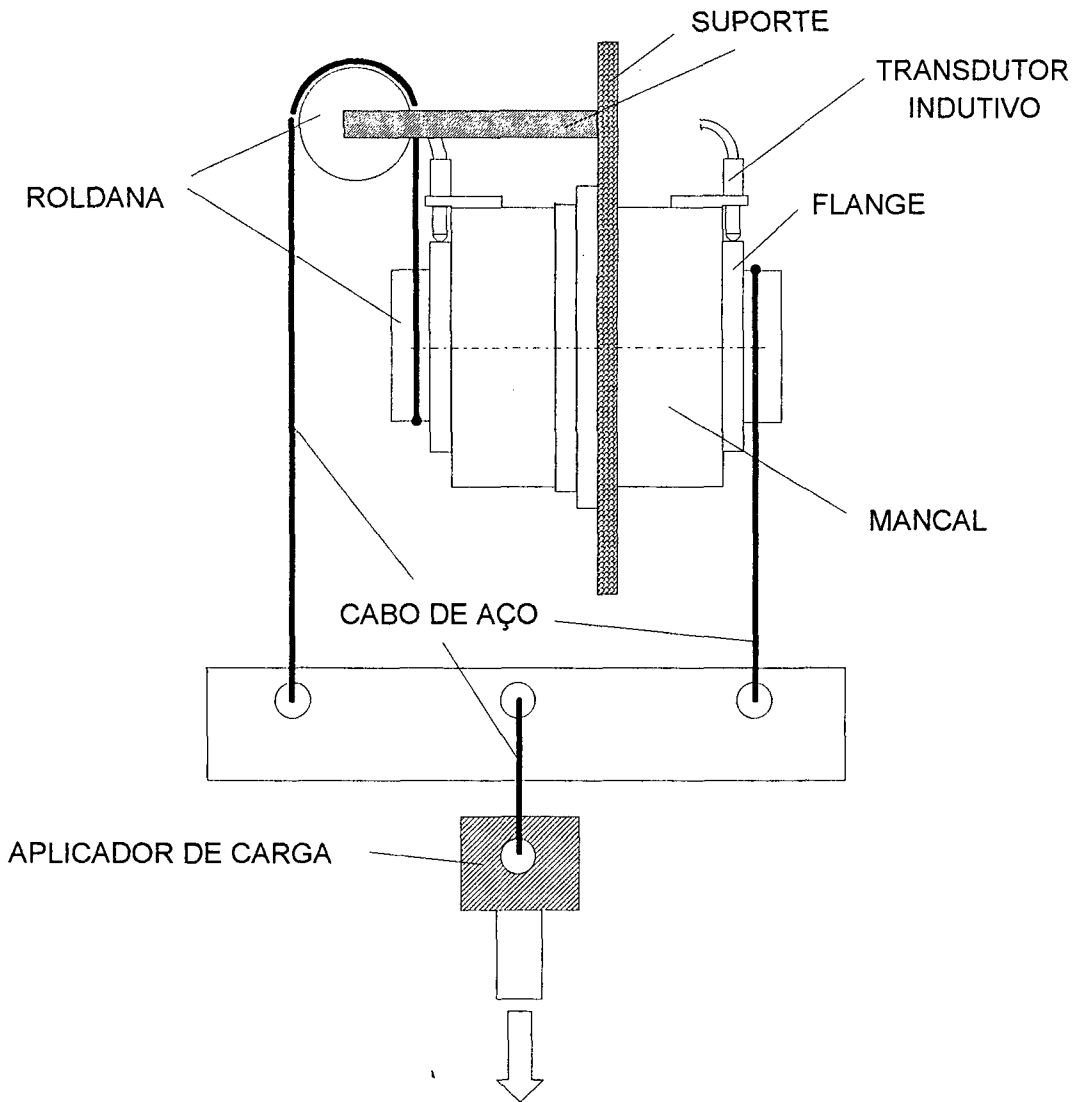


Figura 6.4 - Esquema do ensaio de carga de momento.

A seguir estão relacionados alguns dados referentes à confiabilidade dos experimentos:

- * Histerese máxima: $0,7 \mu\text{m}$
- * Indeterminação de resultado máxima: $\pm 1,5 \mu\text{m}$
- * Indeterminação do resultado média: $\pm 0,45 \mu\text{m}$
- * Dispersão de medição máxima do SM: $\pm 0,7 \mu\text{m}$

Na análise das componentes de erro das medições, procedeu-se segundo (19). Foram realizados três ciclos de cada experimento, composto de carga e descarga para verificação de histerese. Inicialmente, a grandeza a medir (deslocamento da esfera em relação ao estator) foi considerada variável, pois a espessura do filme de ar e, conseqüentemente, a posição

esfera/estator, é muito sensível a variações de pressão que ocorriam freqüentemente, além de variações de temperatura, que ocorreram por defeito no controle do sistema de refrigeração. No entanto, mais tarde verificou-se que o sistema de medição utilizado não era sensível a estas variações da grandeza a medir, devido à grande incerteza de medição apresentada. Conseqüentemente, a grandeza a medir foi tratada como invariável.

A média das medidas foi corrigida com o erro sistemático do SM. A histerese apresentada é referente à máxima dos 39 experimentos realizados e a histerese média ficou abaixo deste valor. A incerteza do resultado segundo (19) é o valor da dispersão das medições (95%), dividido pela raiz quadrada do número de medidas.

O resultado dos experimentos foi parcialmente prejudicado pela má qualidade do sistema de medição utilizado. A calibração, que foi realizada após os experimentos, revelou uma incerteza de medição de $1,3 \mu\text{m}$. Esta pôde ser separada em erro sistemático e dispersão, já que a curva de erro foi gerada. O conhecimento do erro sistemático, para cada ponto da faixa de operação do SM, fez com que a incerteza do resultado das medições fosse reduzida. No entanto, a parcela aleatória causou uma incerteza relativamente grande no valor da rigidez, o qual é levantado por derivação da curva experimental. Porém, numa análise final, pode-se afirmar que os resultados dos experimentos são bastante úteis para a comparação do desempenho para diferentes configurações do mancal testado. O valor da rigidez não pode ser considerado como absoluto, mas é suficientemente bom para avaliar as conclusões tomadas mais adiante (Capítulo 8) sobre os parâmetros testados. Ele pode ainda orientar na escolha de parâmetros otimizados para o projeto de mancais aerostáticos duplo-esféricos.

7. RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS

Os dados levantados nos experimentos foram processados e utilizados para a confecção dos gráficos apresentados a seguir.

Os gráficos foram feitos com o auxílio de um programa de computador específico para tal (GRAPHER for windows), que permitiu o ajuste dos mais variados tipos de curvas, com base nos pontos experimentais. A função que melhor descreveu o comportamento do mancal foi a polinomial. Com base em informações estatísticas, fornecidas pelo programa, chegou-se a determinar que o polinômio que melhor se ajustava aos pontos era de grau três. Isto era interessante pelo fato de que a derivada desta curva é uma parábola, a qual apresenta um ponto de máximo, que estava sendo buscado. Este ponto de rigidez máxima é utilizado para a determinação da condição otimizada do mancal.

Na apresentação das curvas, buscou-se apresentar situações comparativas, cujos parâmetros em questão são destacados no gráfico. Os outros parâmetros, conseqüentemente, são mantidos constantes nas condições padrão, as quais são apresentadas a seguir:

- * Raio das semi-esferas: 50 mm
- * Folga radial para excentricidade zero: 15,4 μm
- * Razão de pressão de alimentação ($P_o - P_a / P_a$): 6
- * Diâmetro dos restritores: 0,18 mm
- * Número de entradas de ar por carreira: 1
- * Excentricidade relativa radial (ϵ_r): 0,0

Convém também salientar que, nos gráficos, as curvas não cruzam o eixo vertical no ponto zero devido ao peso próprio do mancal, acrescido do peso do dispositivo de aplicação da carga que já devia estar montado ao se iniciarem os experimentos.

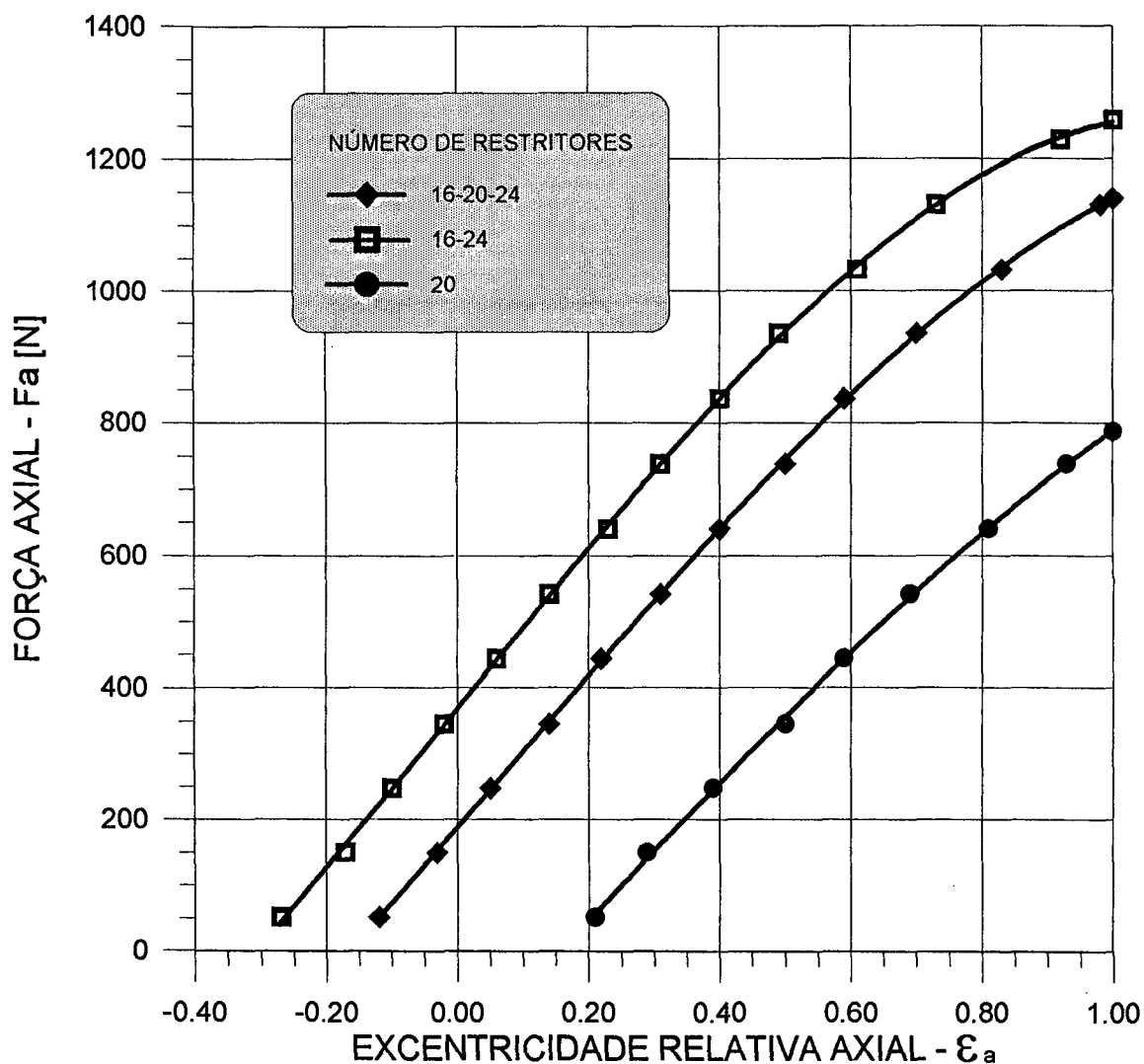


Figura 7.1 - Capacidade de carga axial em função da excentricidade relativa axial para diferentes números de carreiras, para 16-20-24 restritores.

Comentário

Neste gráfico pode-se observar um fato único entre todos os ensaios realizados: o mancal com duas carreiras de restritores (16-24) apresentou uma maior capacidade de carga do que quando três carreiras (16-20-24) foram utilizadas. Este fato não tem uma explicação clara, mas seu comportamento pode estar alterado pelos erros aleatórios existentes. Pode-se considerar esta curva como um "outlier", ou seja, um ponto fora.

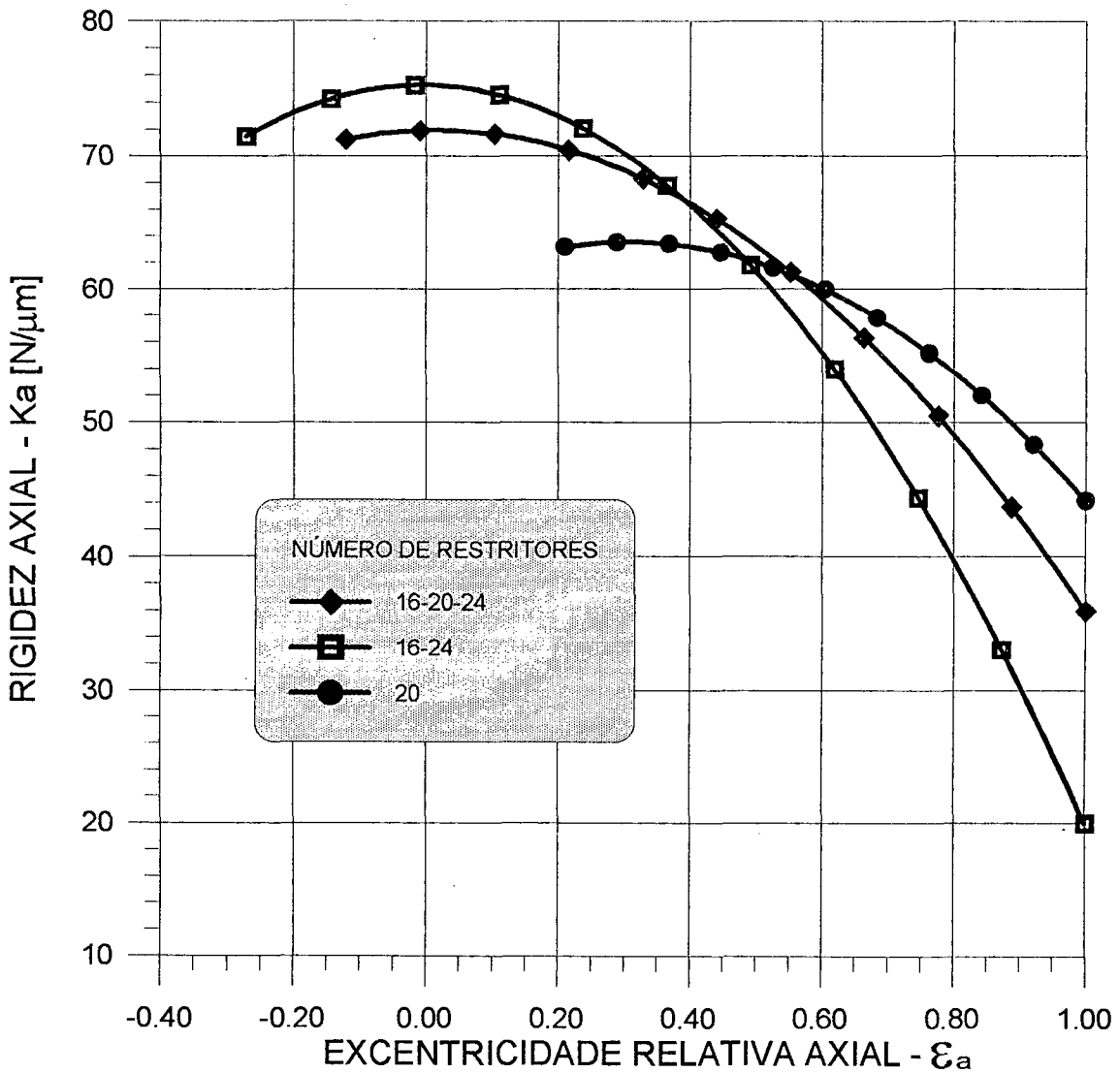


Figura 7.2 - Rigidez axial em função da excentricidade relativa axial, variando o número de carreiras, para 16-20-24 restritores.

Comentário

Pode-se ver claramente que a diferença de rigidez, obtida entre as configurações de duas e três carreiras de restritores, está dentro da faixa de erro esperada. Além disso, fica claro que o mancal, com apenas uma carreira de 20 restritores, tem um desempenho inferior ao dos outros dois casos, porém apresentando uma menor queda na rigidez ao longo da excentricidade relativa axial.

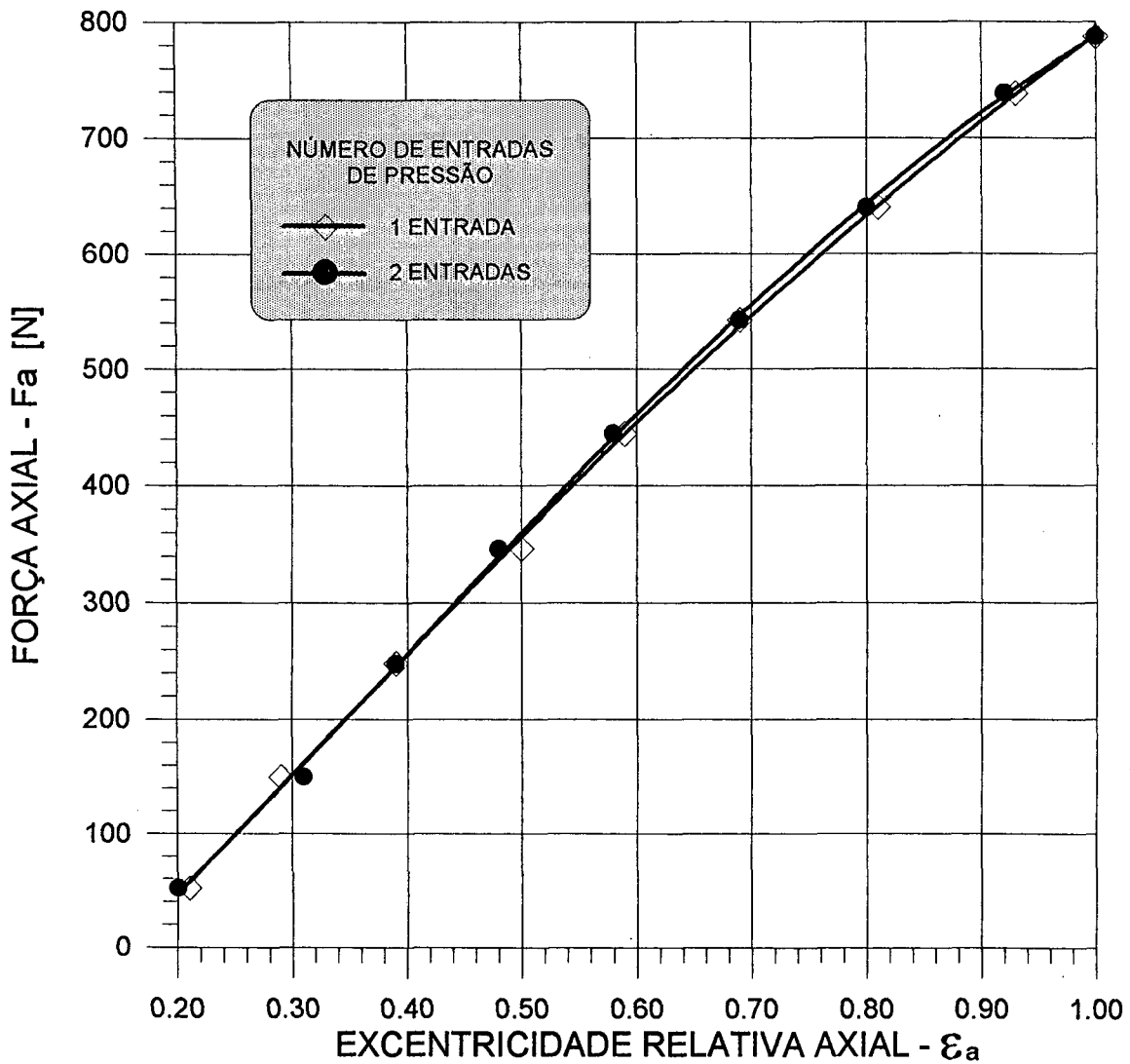


Figura 7.3 - Capacidade de carga axial em função da excentricidade relativa axial para uma e duas entradas de ar por carreira, para o mancal com uma carreira de 20 restritores, com razão de pressão de alimentação igual a 6.

Comentário

Pode-se claramente verificar neste gráfico que não há diferença considerável entre alimentar o mancal com uma ou duas entradas de ar. Isto elimina a dúvida quanto às perdas internas no canal de alimentação serem consideráveis ou não.

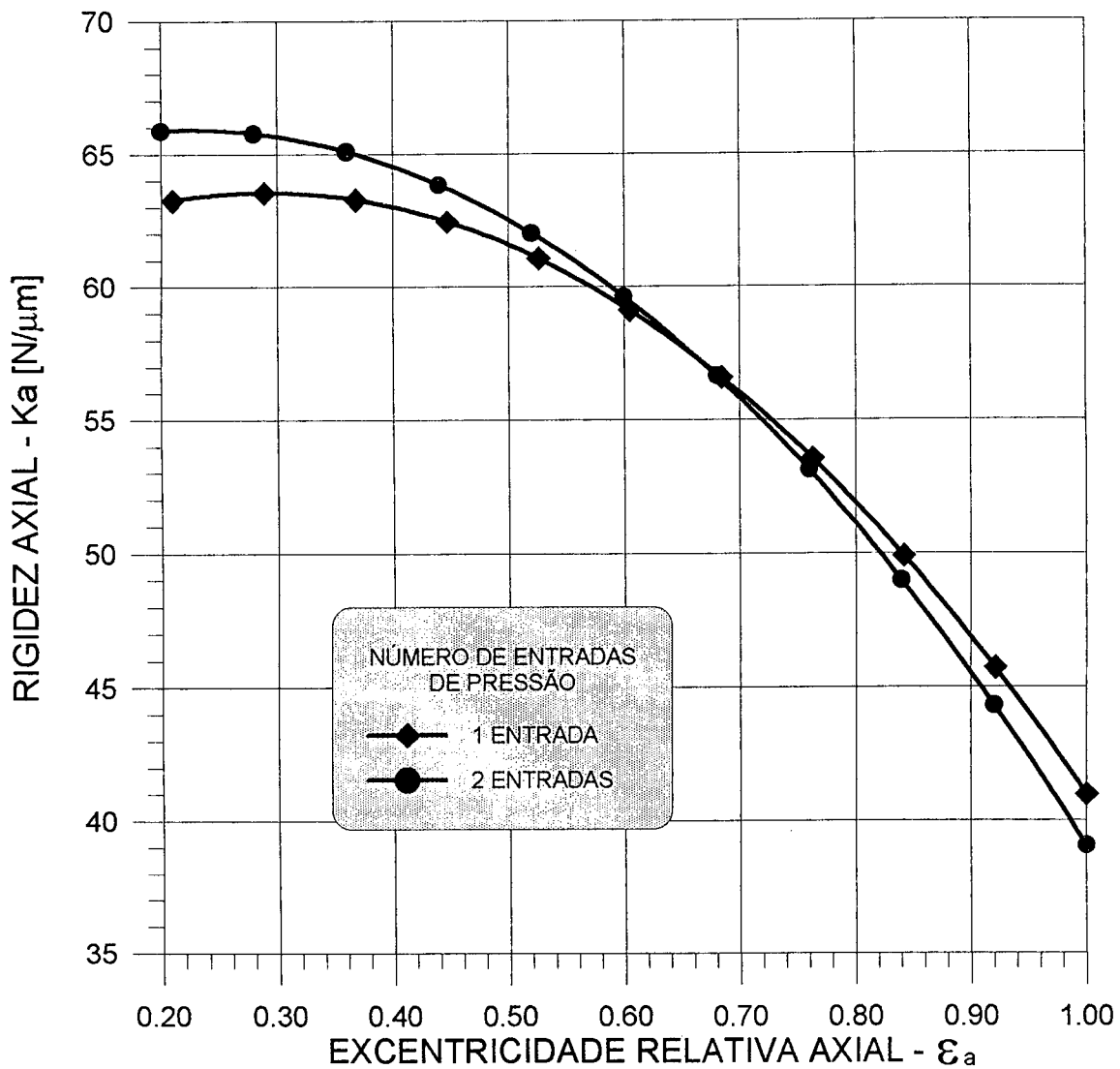


Figura 7.4 - Rigidez axial em função da excentricidade relativa axial para o mancal com uma carreira de 20 restritores, sendo alimentada por uma e duas entradas de ar, com $(P_o - P_a)/P_a = 6$.

Comentário

Pode-se afirmar que as perdas internas no canal de alimentação são insignificantes e que não há diferença entre a utilização de uma ou duas carreiras para alimentação de ar. A diferença de rigidez registrada neste gráfico é, certamente, causada pelos erros aleatórios presentes.

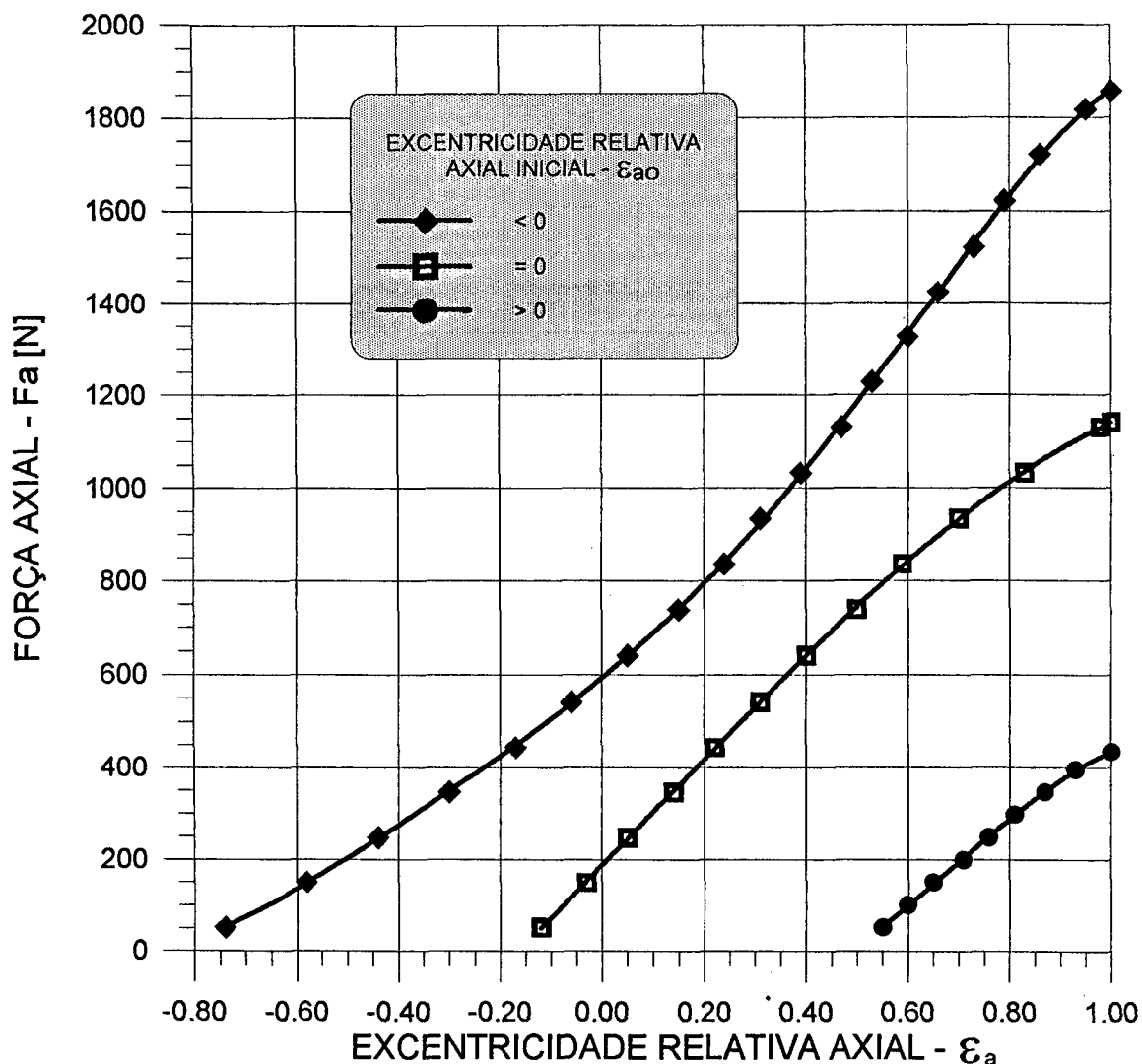


Figura 7.5 - Capacidade de carga axial em função da excentricidade relativa axial, para diferentes valores de ajustagem da excentricidade relativa axial inicial. O mancal foi testado com três carreiras de restritores (16-20-24).

Comentário

Este gráfico é bastante interessante, pois mostra o efeito da pré-carga e da forma do filme de ar entre as superfícies esféricas sobre o desempenho do mancal. A maior capacidade de carga apresentada pelo mancal, com excentricidade relativa axial inicial menor que zero, pode ser explicada pela menor pré-carga imposta ao mancal. Porém, deve-se destacar que, nesta situação, o consumo de ar é maior e a resistência a outros tipos de carga é menor.

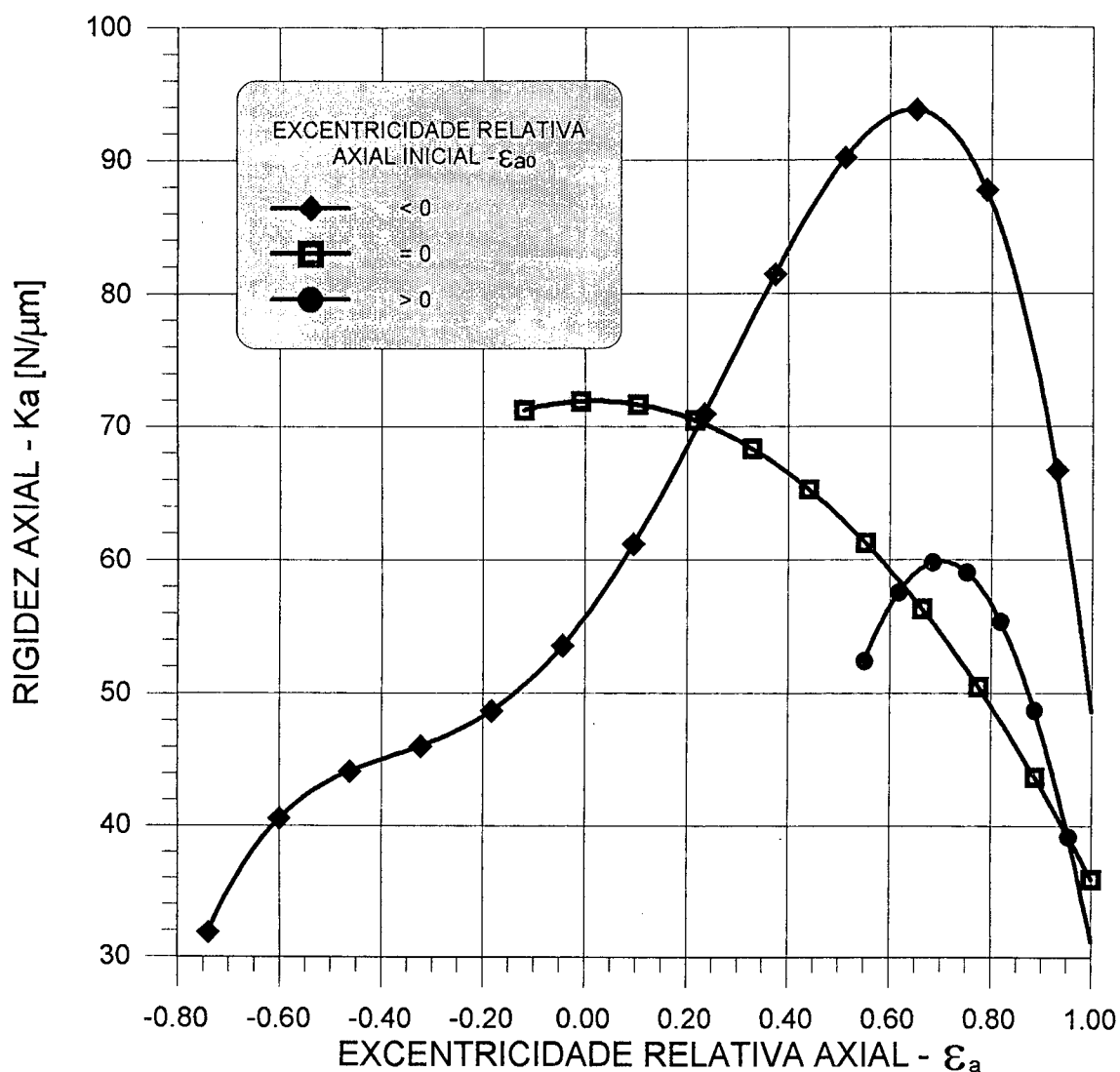


Figura 7.6 - Rigidez axial em função da excentricidade relativa axial, para diferentes valores de ajustagem da excentricidade relativa axial inicial. Mancal testado com três carreiras de restritores (16-20-24).

Comentário

É possível verificar que, na condição de ajuste da excentricidade relativa axial inicial menor do que zero, a rigidez é baixa ao longo da maior parte da faixa de operação do mancal, atingindo valores bons apenas quando a espessura do filme de ar é bastante pequena. Quando for maior do que zero, haverá baixa rigidez ao longo de toda faixa de operação. Quando igual a zero, a rigidez é máxima no início da faixa de operação.

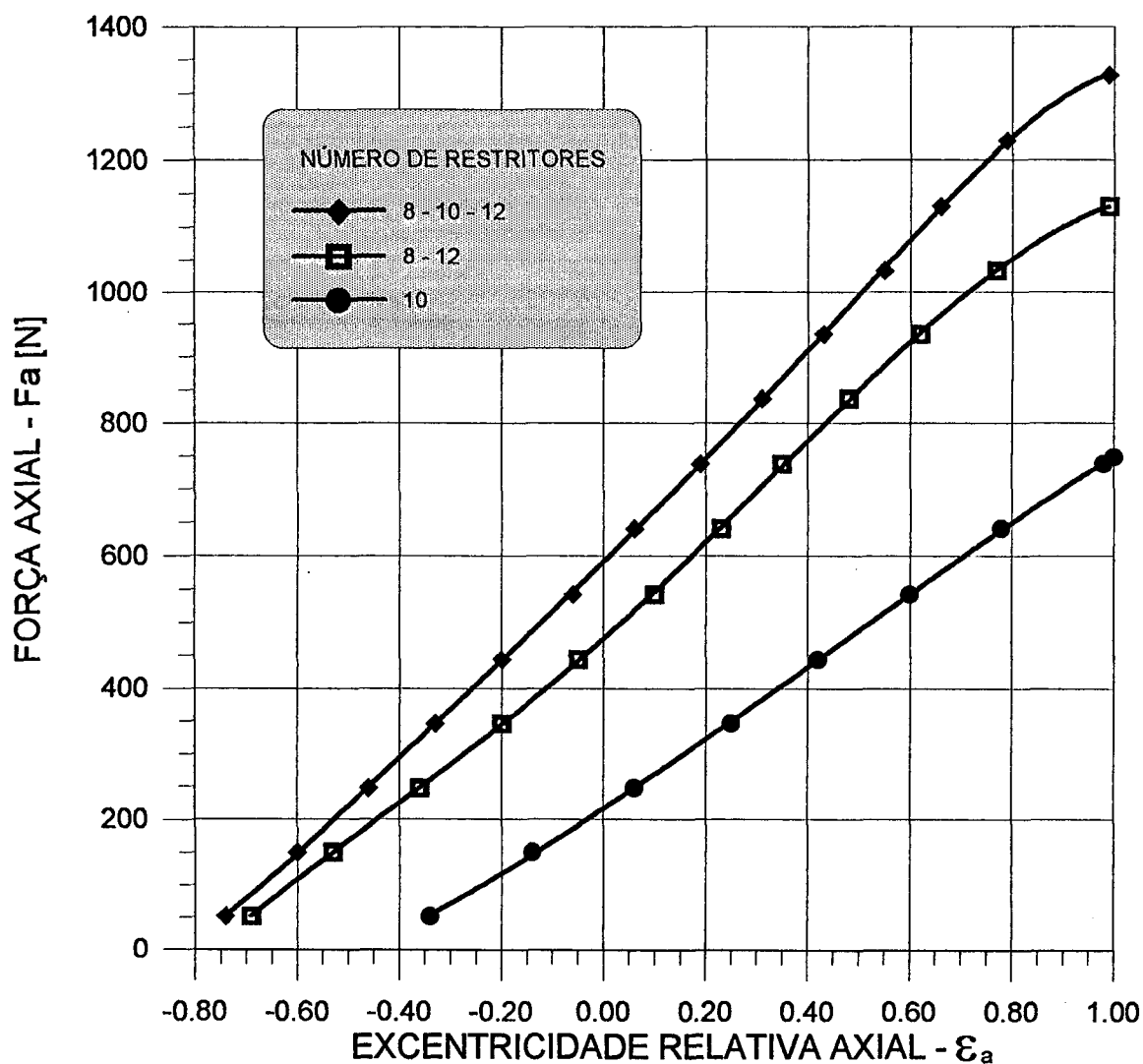


Figura 7.7 - Capacidade de carga axial em função da excentricidade relativa axial, para o mancal com uma, duas e três carreiras de 8-10-12 restritores.

Comentário

O mancal com três carreiras de restritores apresenta uma pequena superioridade na capacidade de carga axial, com relação ao mancal com duas carreiras. Pode-se observar, também, a tendência a um comportamento linear ao longo da maior parte da faixa de operação.

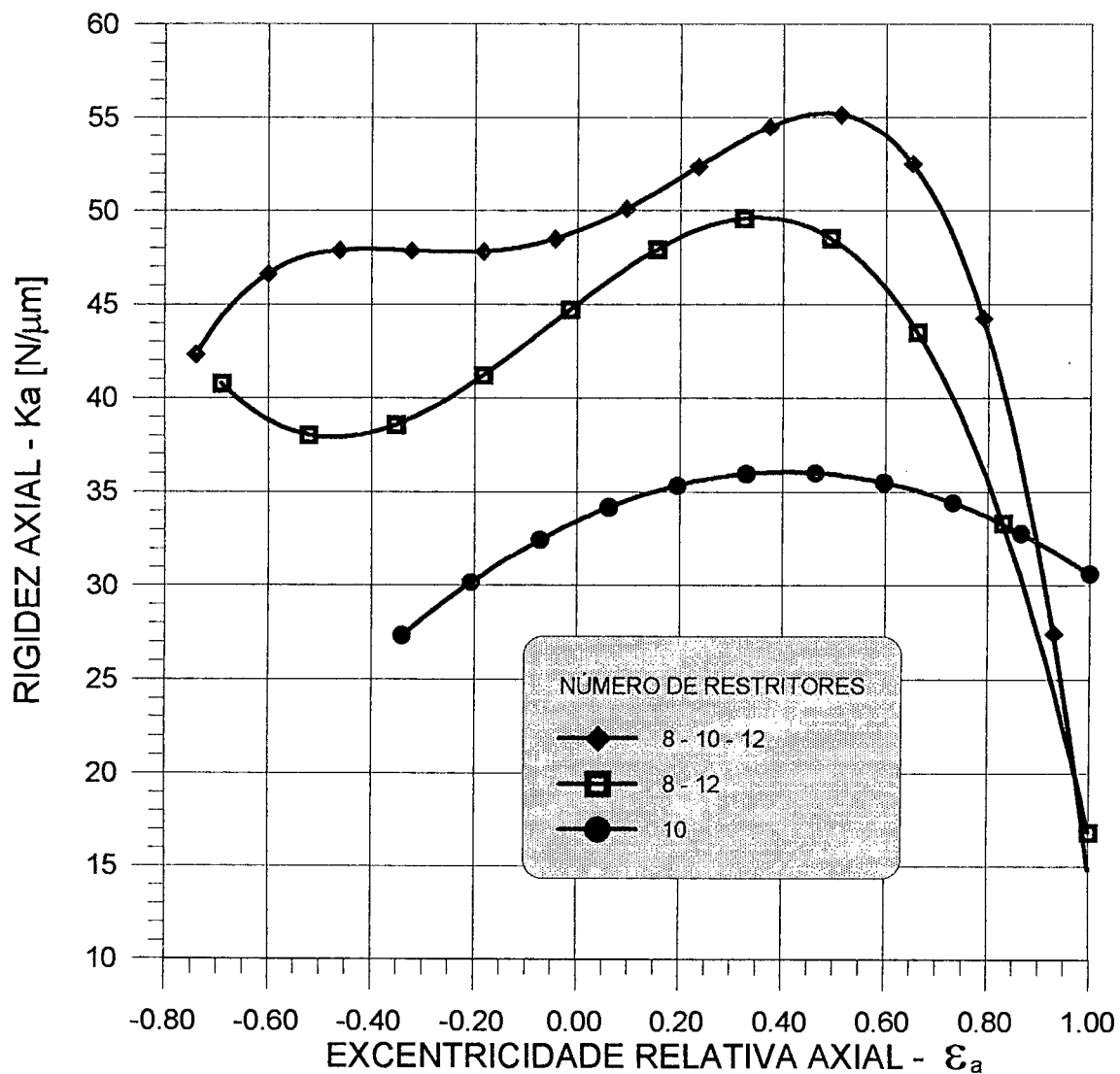


Figura 7.8 - Rigidez axial em função da excentricidade relativa axial, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 8-10-12 restritores.

Comentário

Repete-se o comportamento da capacidade de carga axial (Fig. 7.7). O mancal com três carreiras apresenta uma rigidez um pouco superior à do mancal com duas carreiras. No caso de uma carreira de restritores, o desempenho é o pior.

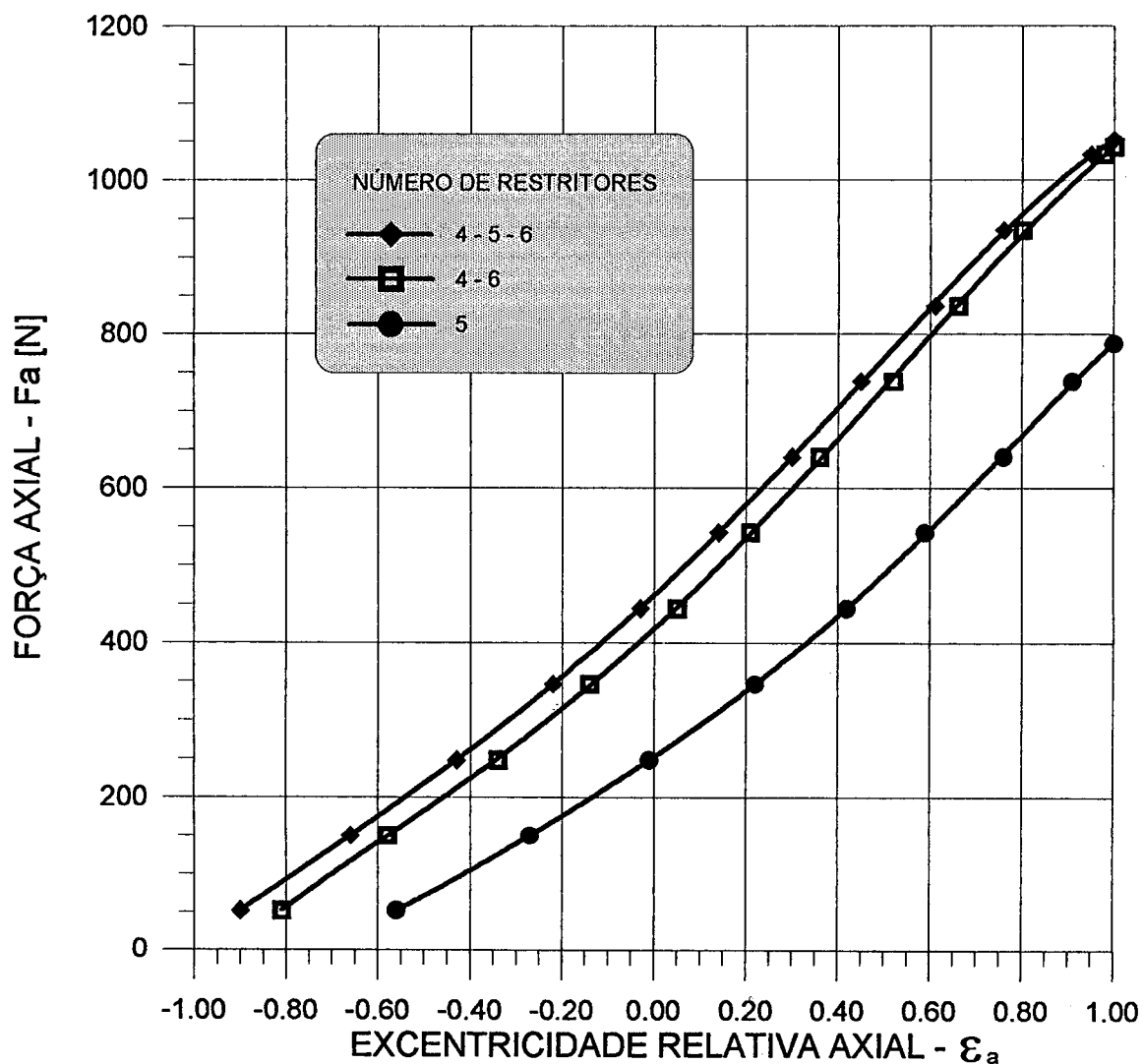


Figura 7.9 - Capacidade de carga axial em função da excentricidade relativa axial, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 4-5-6 restritores.

Comentário

Há uma pequena superioridade do mancal de três carreiras em relação ao de duas carreiras. Na configuração de uma carreira de 5 restritores, encontra-se o pior desempenho.

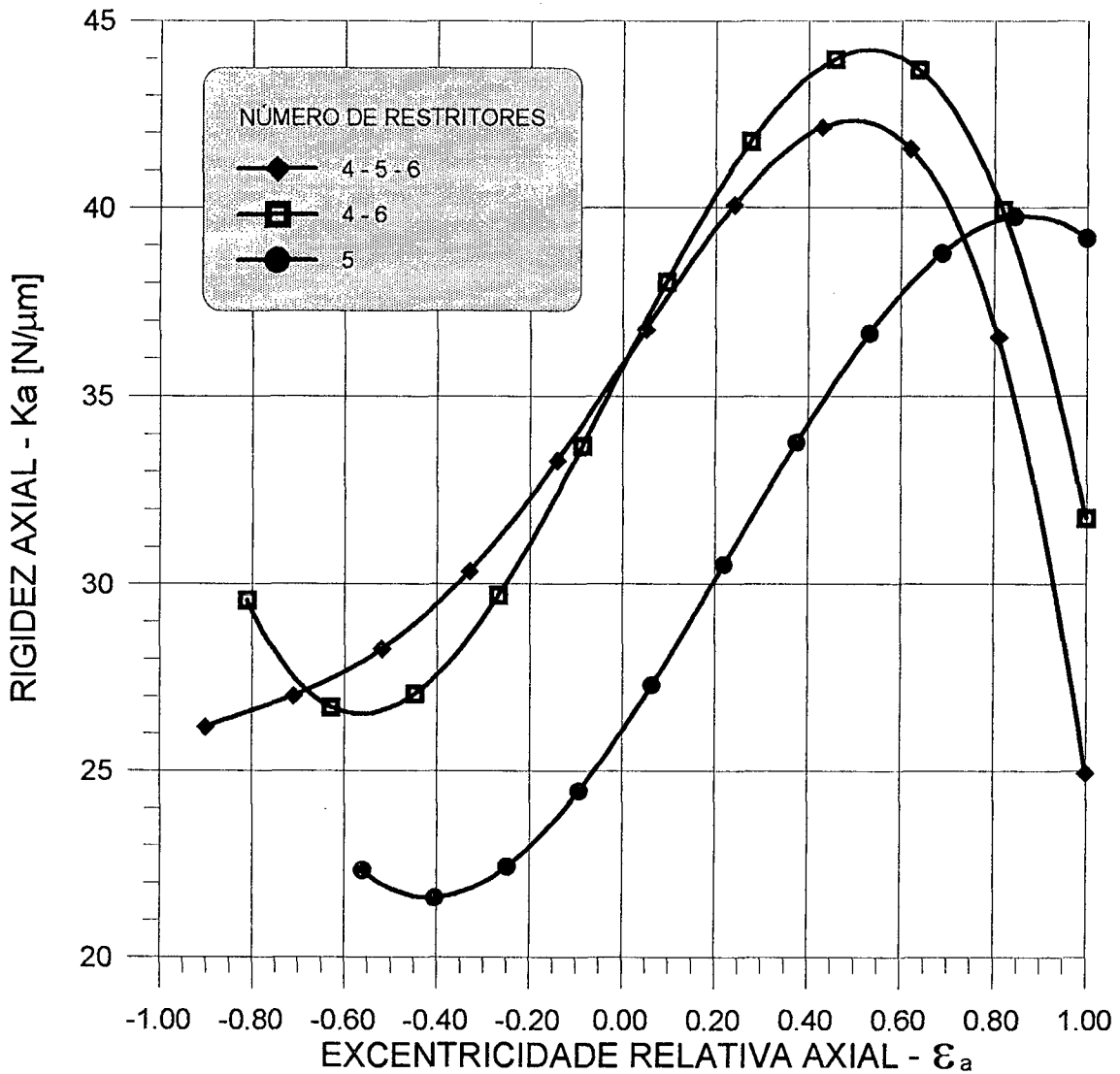


Figura 7.10 - Rigidez axial em função da excentricidade relativa axial, para o mancal com uma, duas e três carreiras de 4-5-6 restritores.

Comentário

Novamente, o comportamento do mancal com duas e três carreiras de restritores é muito semelhante e, com uma carreira, é inferior. A diferença encontrada entre o mancal com uma e duas carreiras está dentro da faixa de incerteza da rigidez.

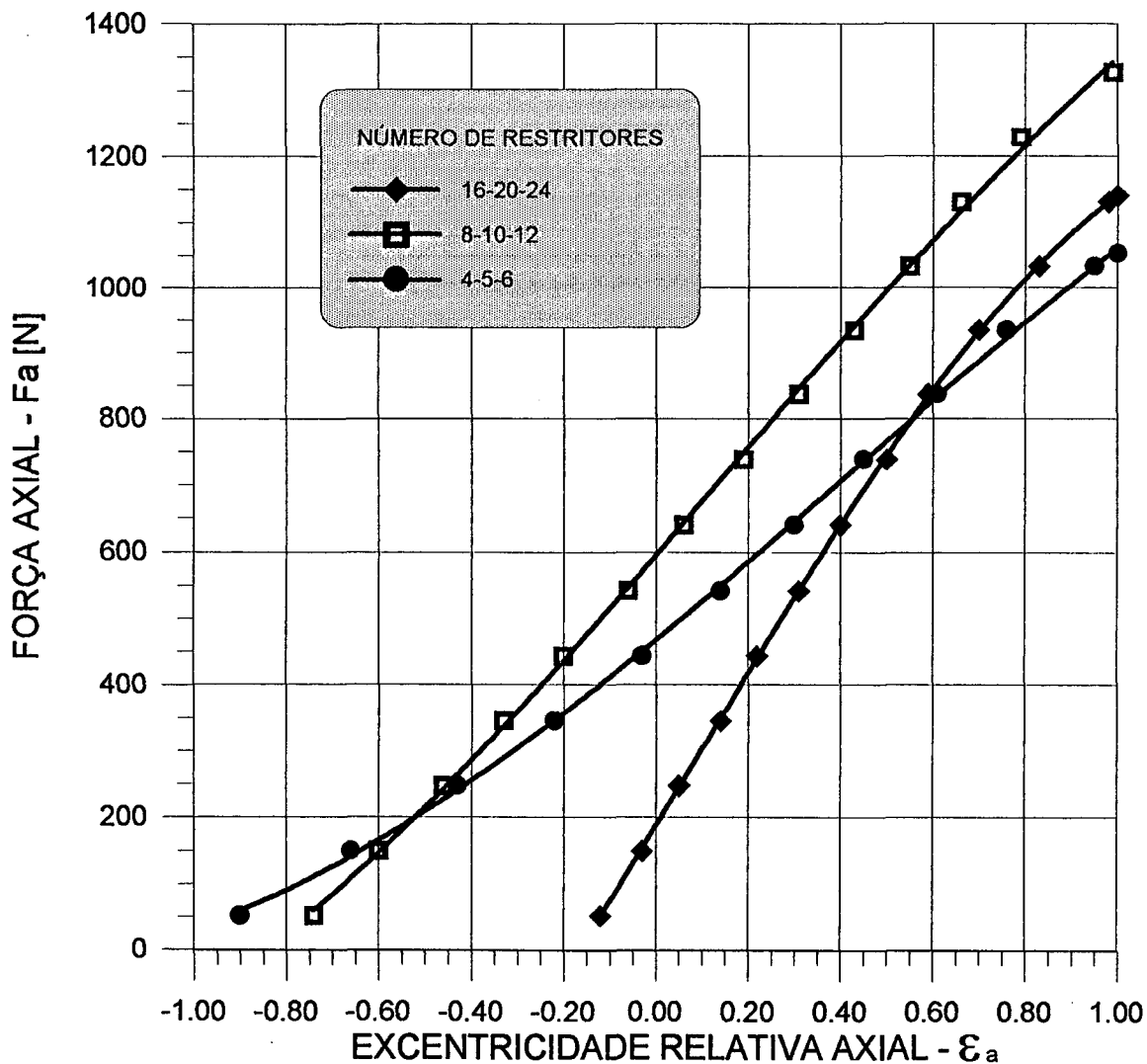


Figura 7.11 - Força axial em função da excentricidade relativa axial, para o mancal com diferentes números de restritores nas três carreiras.

Comentário

A maior capacidade de carga axial foi apresentada pelo mancal com 8-10-12 restritores. Destaque para o comportamento linear nas três condições.

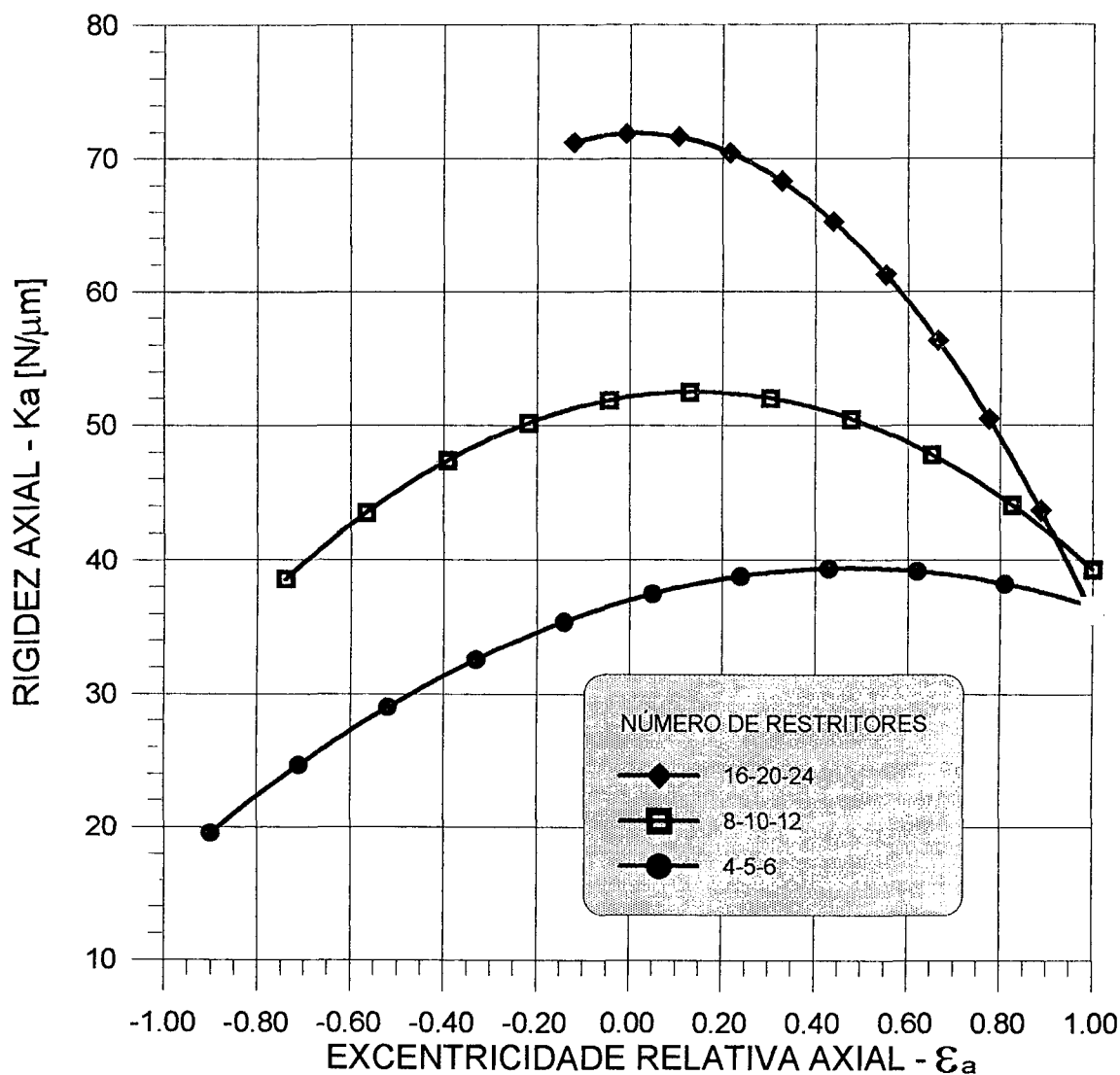


Figura 7.12 - Rigidez axial em função da excentricidade relativa axial, para o mancal com diferentes números de restritores com três carreiras.

Comentário

Apesar de apresentar uma capacidade de carga menor, o mancal com 16-20-24 restritores tem maior rigidez, dado bastante importante para a seleção e aplicação de mancais aerostáticos. À medida em que o número de restritores é diminuído a rigidez axial também diminui.

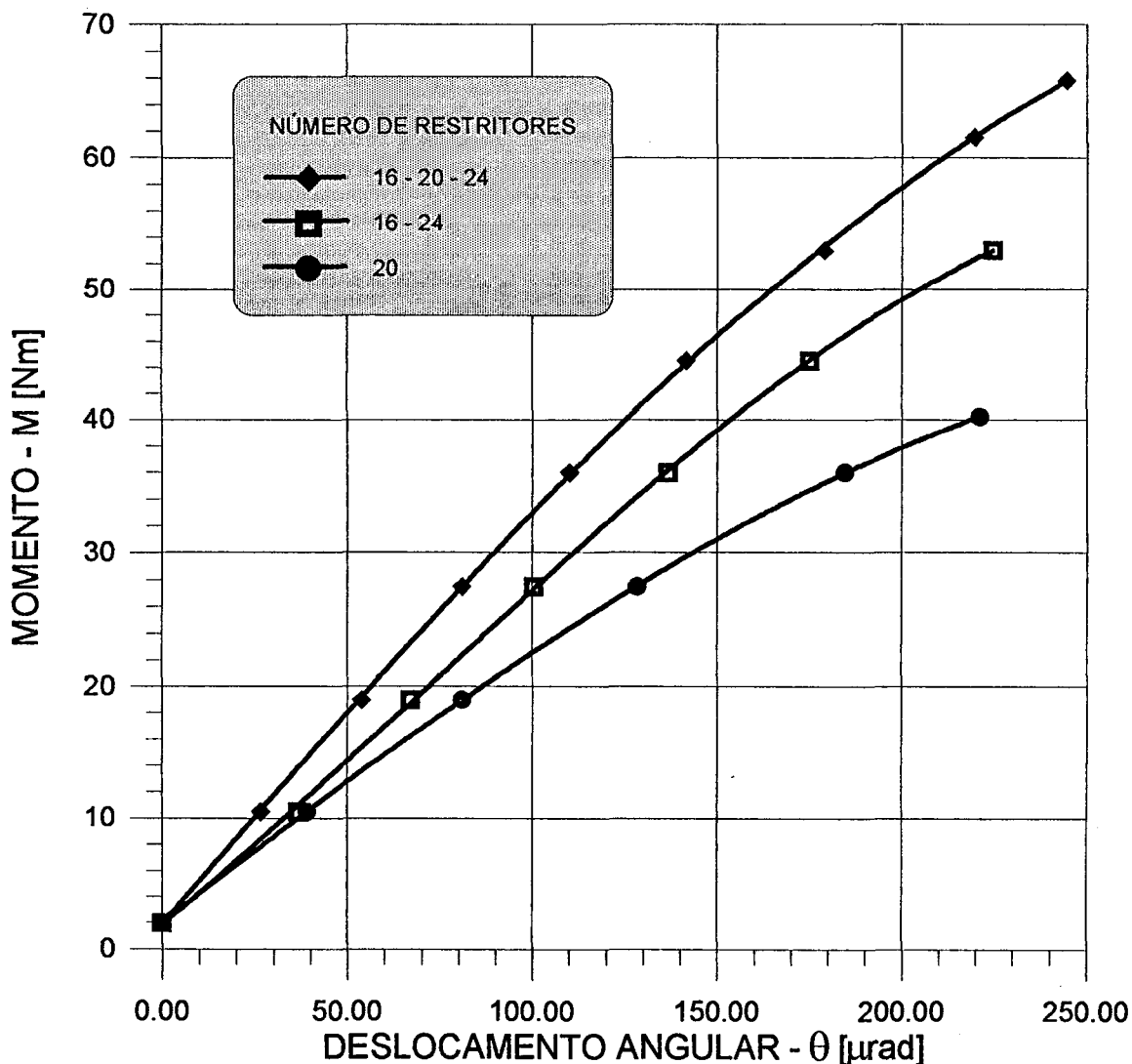


Figura 7.13 - Capacidade de carga de momento em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera em relação ao anel externo do mancal, para uma, duas e três carreiras com 16-20-24 restritores.

Comentário

A melhor capacidade de carga de momento é apresentada pelo mancal com três carreiras de restritores, abaixo deste, está o mancal com duas e uma carreira. O comportamento da curva não é muito linear, mas verifica-se uma boa ajustagem da curva aos pontos experimentais.

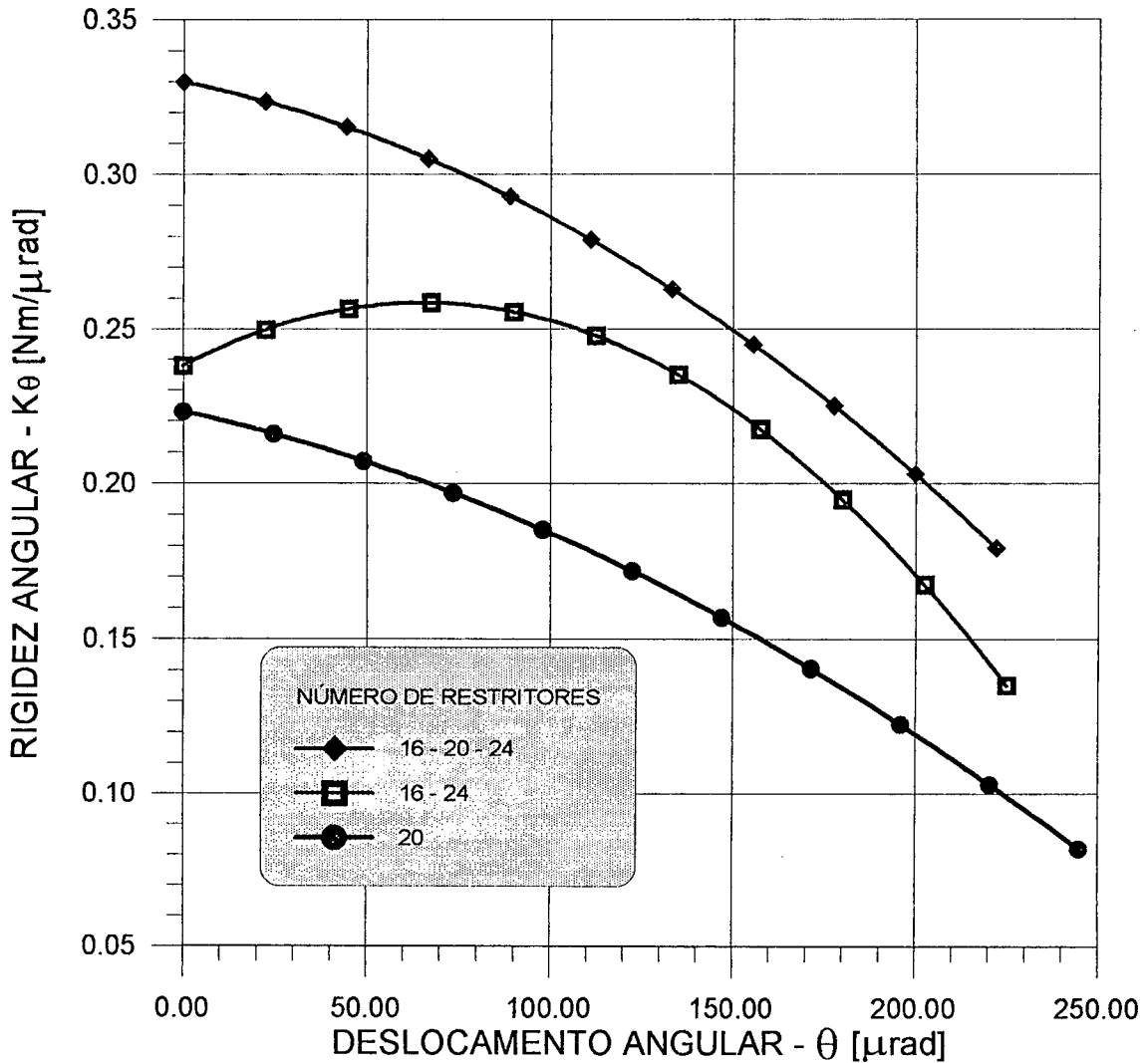


Figura 7.14 - Rigidez angular em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 16-20-24 restritores.

Comentário

O mancal configurado com três carreiras de restritores apresenta a melhor rigidez angular. No caso de duas carreiras, o comportamento é intermediário, sendo pior no mancal com uma carreira de 20 restritores.

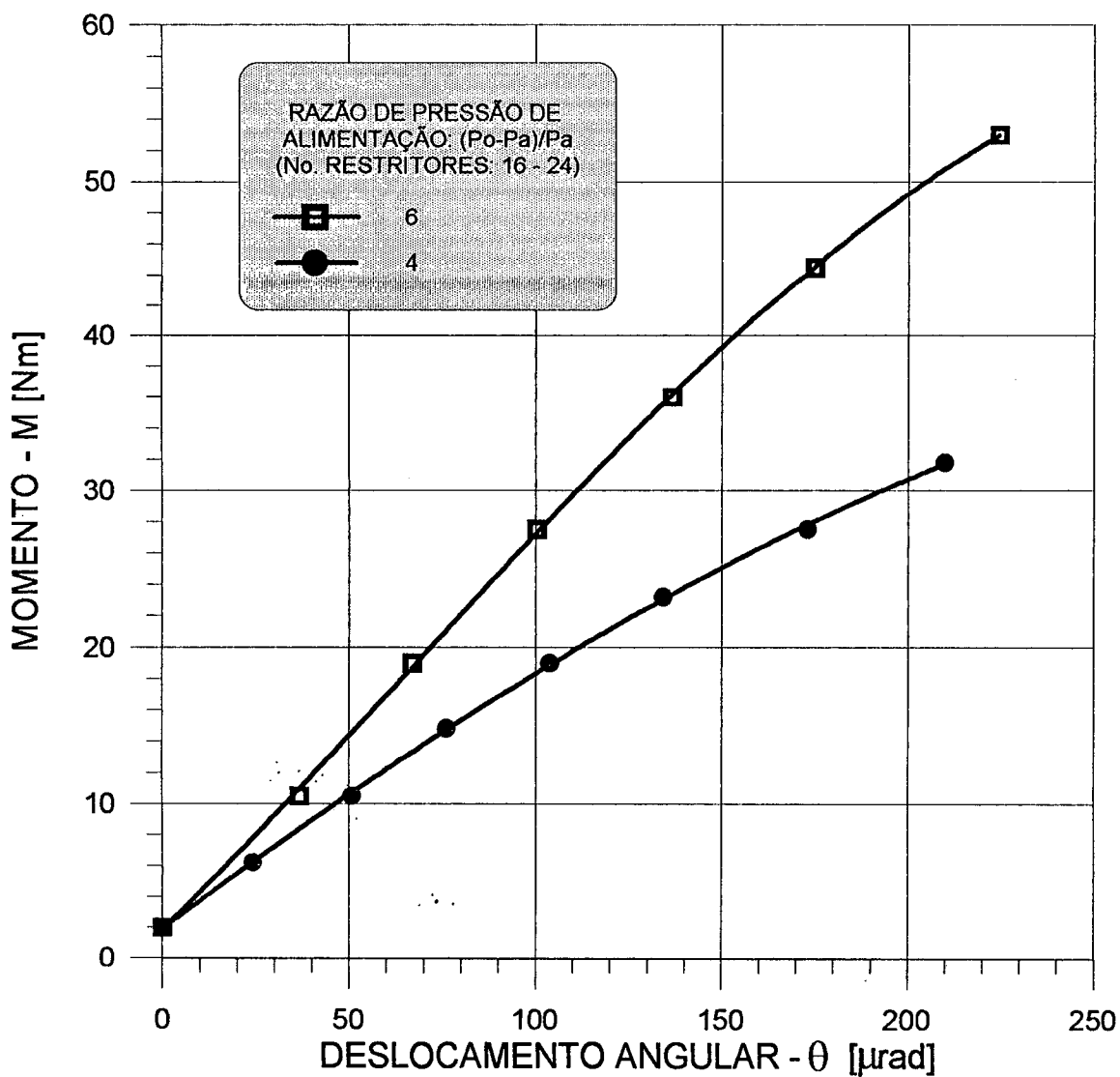


Figura 7.15 - Capacidade de carga de momento em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para diferentes razões de pressão de alimentação.

Comentário

Este gráfico vem confirmar o que já é bem conhecido na literatura de mancais aerostáticos: a influência direta da pressão de alimentação sobre o desempenho do mancal.

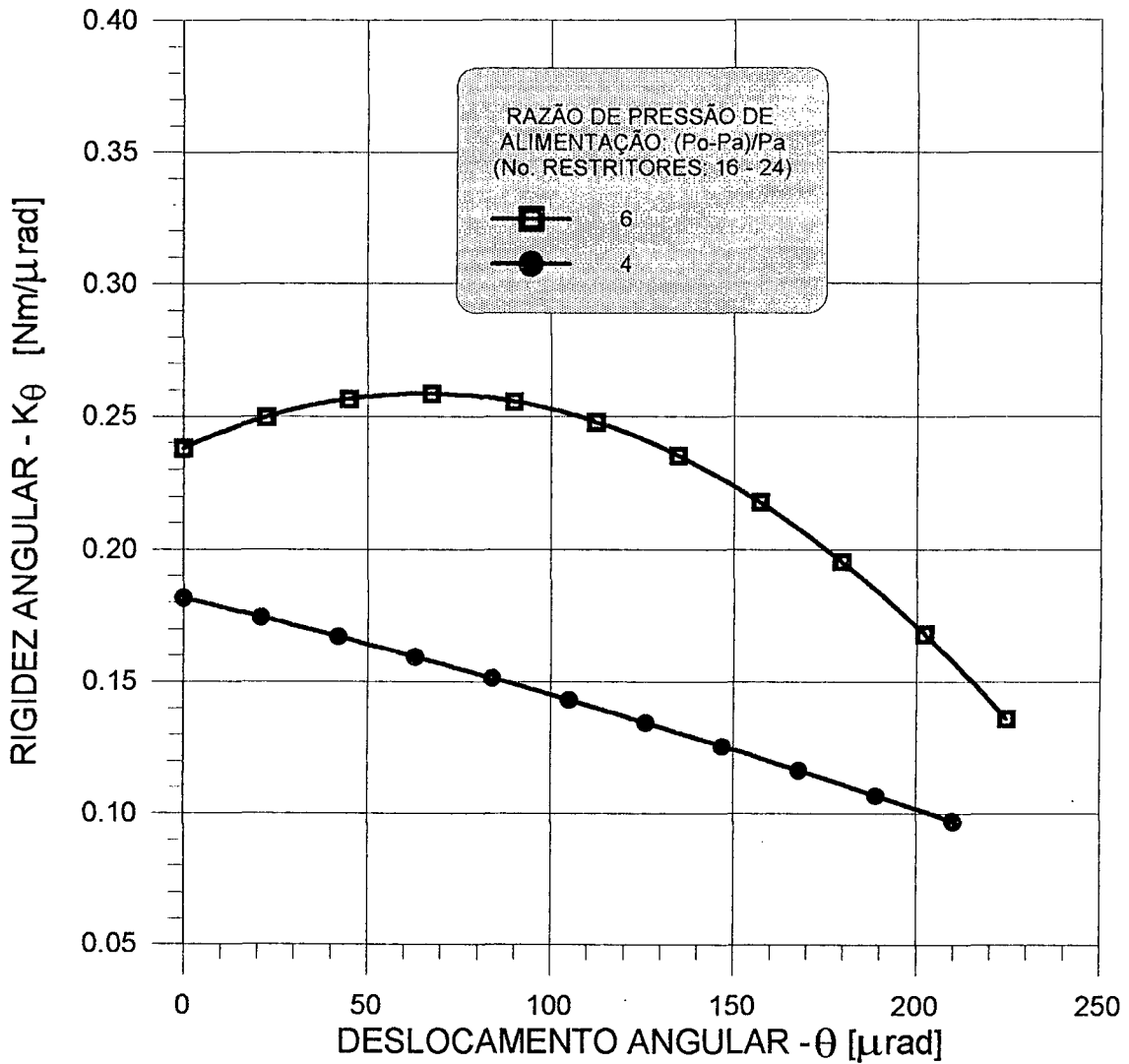


Figura 7.16 - Rigidez angular em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para diferentes razões de pressão de alimentação.

Comentário

A distribuição de pressão dentro da folga existente entre as superfícies do mancal atua sobre a capacidade de carga e, conseqüentemente, sobre a rigidez do mancal. Isto está bem caracterizado neste gráfico.

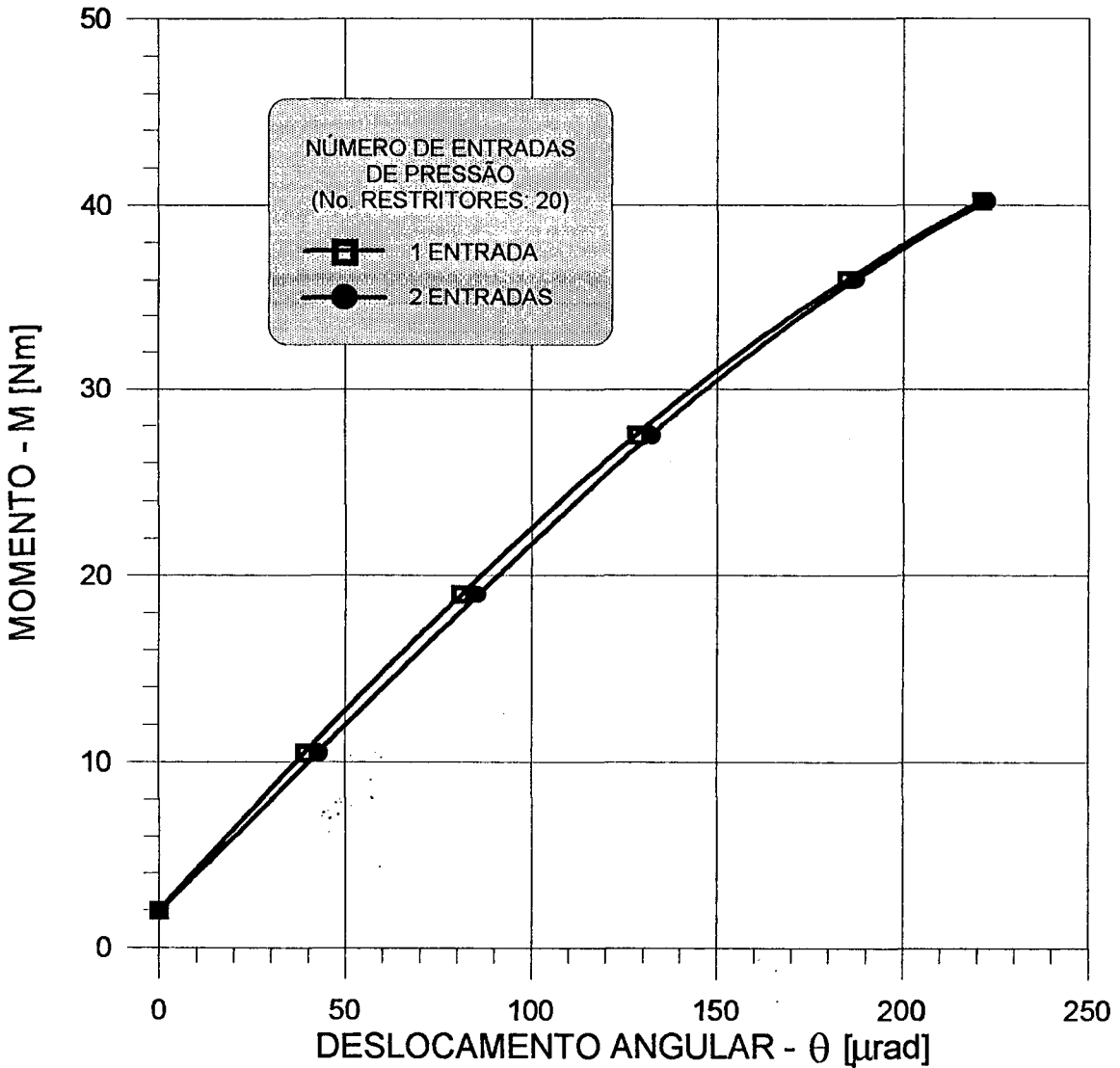


Figura 7.17 - Capacidade de carga de momento em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com uma carreira de 20 restritores, alimentado com uma e duas entradas de ar.

Comentário

Este gráfico prova que as perdas de carga internas do mancal são desprezíveis. O mancal foi alimentado com uma e com duas entradas de ar, diametralmente opostas, e pode-se considerar que não há diferença no seu desempenho.

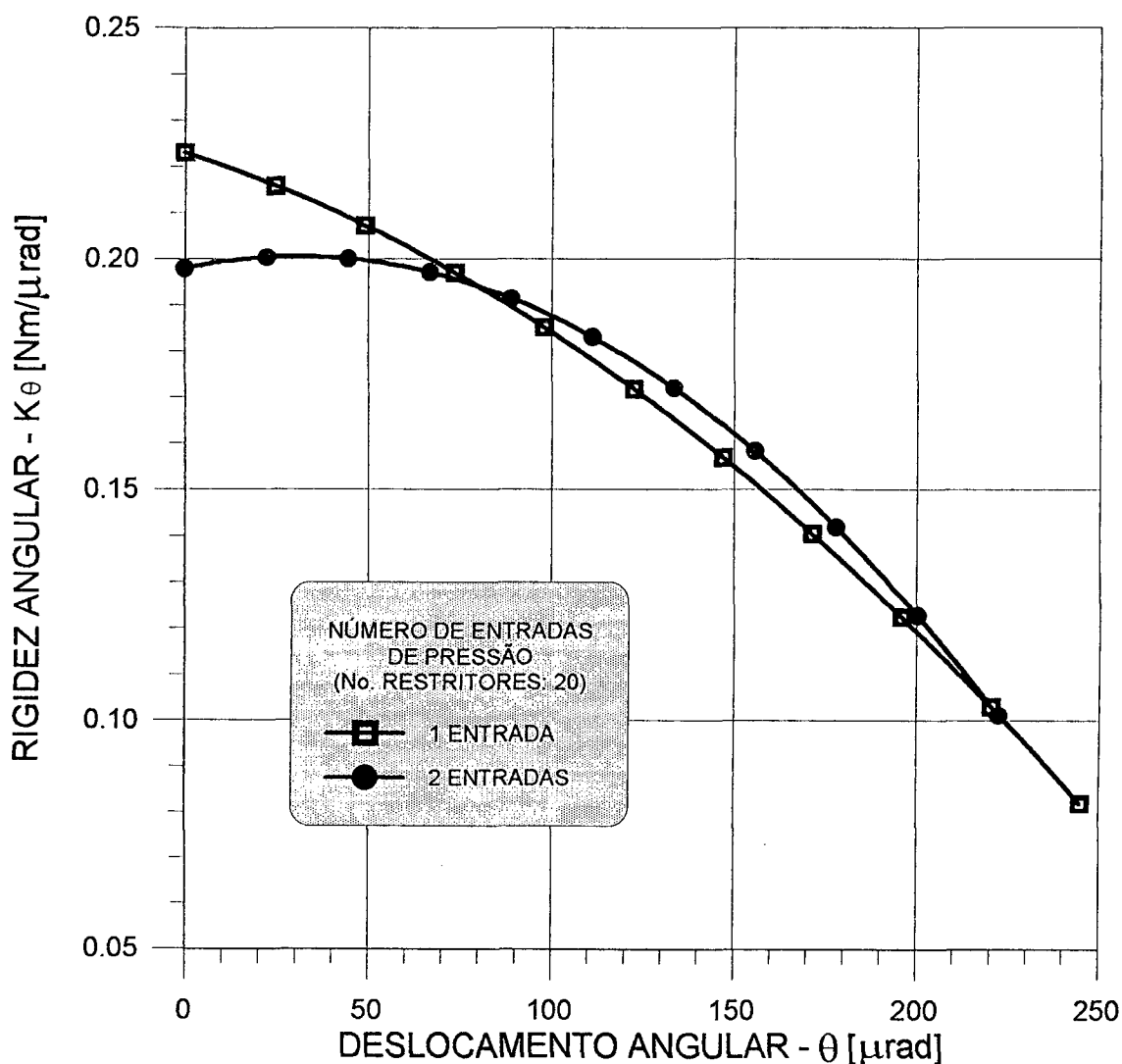


Figura 7.18 - Rigidez angular em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com uma carreira de 20 restritores, alimentado por uma e duas entradas de ar.

Comentário

A pequena diferença na rigidez angular, mostrada neste gráfico, é causada certamente pela parcela de erro aleatório presente nos experimentos. O número de entradas de ar no mancal tem influência desprezível no seu comportamento.

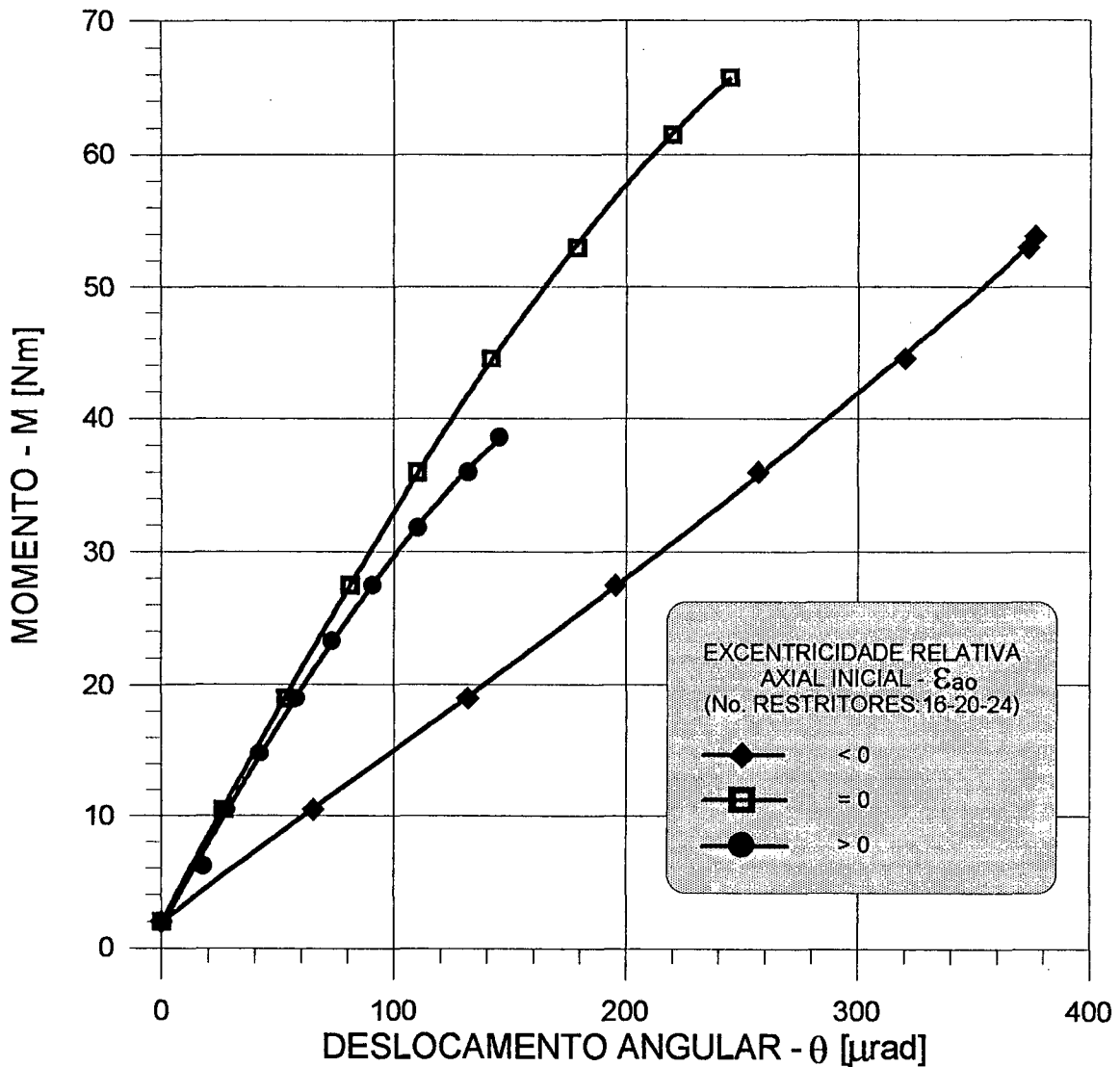


Figura 7.19 - Capacidade de carga de momento em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para diferentes condições de excentricidade relativa axial inicial.

Comentário

Pode-se verificar neste gráfico que o mancal ajustado com excentricidade relativa axial inicial menor do que zero (menor pré-carga) tem a pior resistência a carga de momento, como se esperava. Já nos outros dois casos, pouca diferença pôde ser constatada.

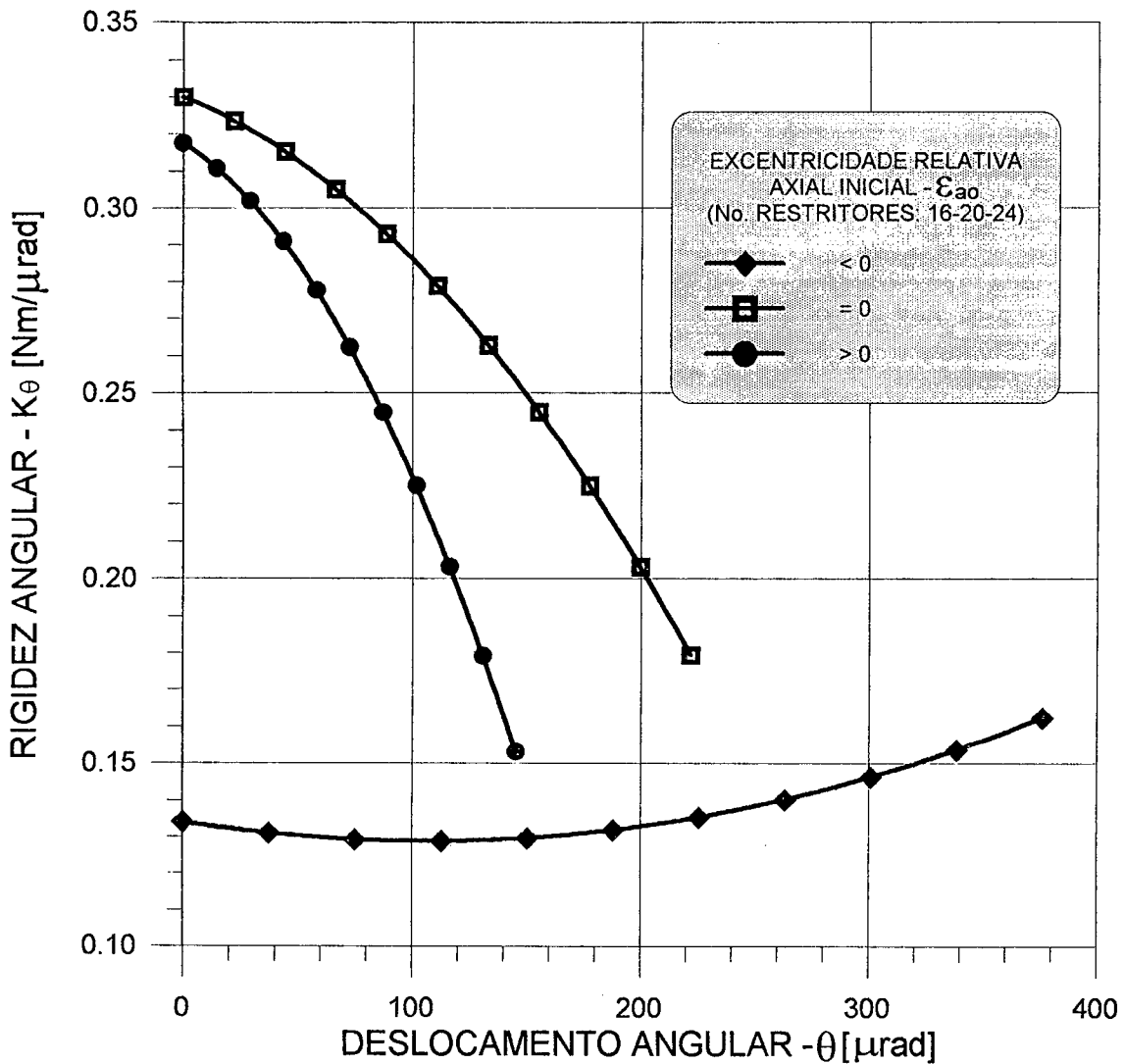


Figura 7.20 - Rigidez angular em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para diferentes ajustes da excentricidade relativa axial inicial.

Comentário

Pode-se notar uma pequena superioridade no comportamento da rigidez para o mancal com $\epsilon_{ao} = 0$ com relação ao mancal com $\epsilon_{ao} > 0$. Já o comportamento do mancal com $\epsilon_{ao} < 0$ pode ser justificado pela menor pré-carga imposta, que causou um comportamento pouco característico.

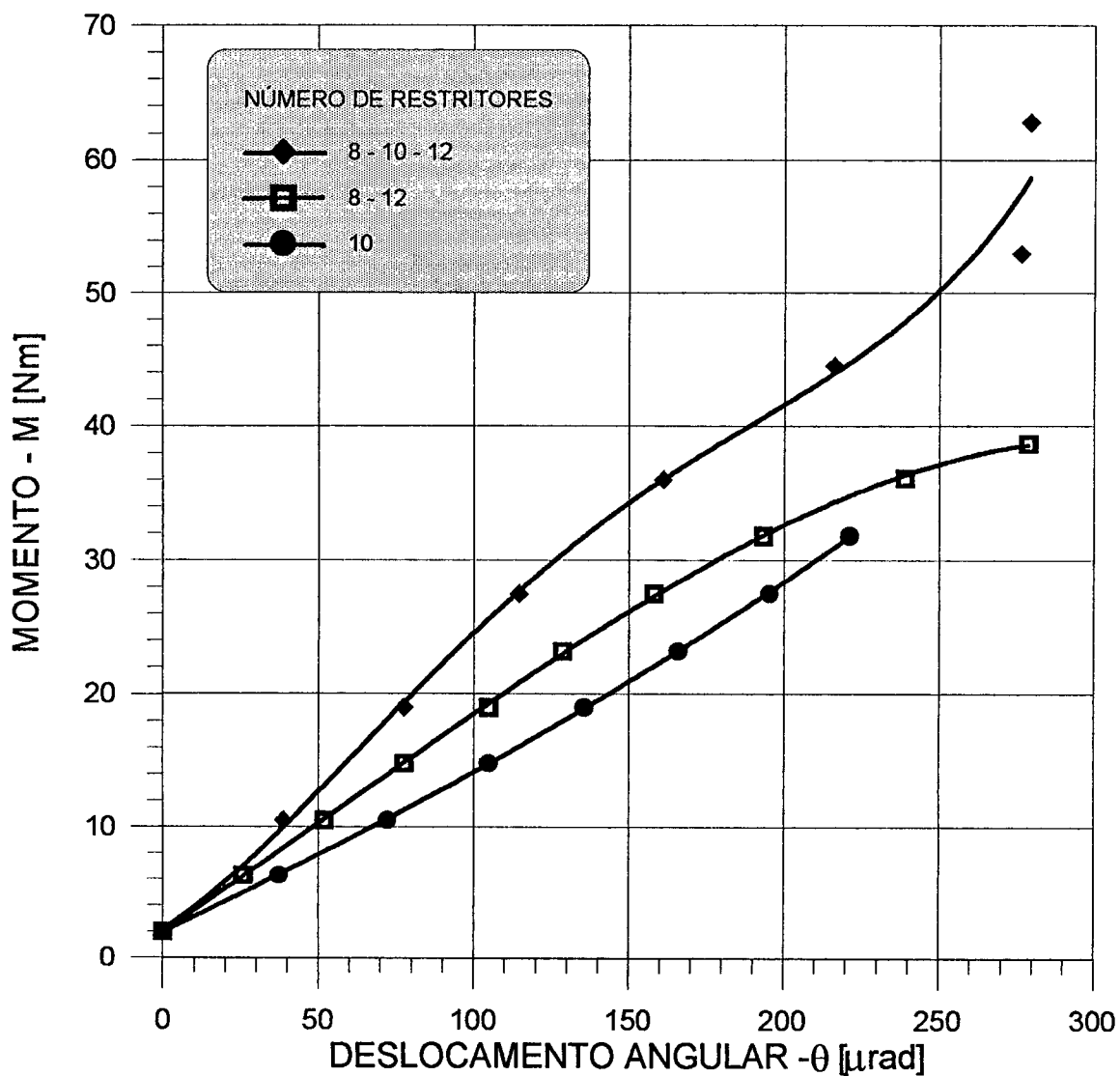


Figura 7.21 - Capacidade de carga de momento em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 8-10-12 restritores.

Comentário

Comportamento da curva para o mancal com três carreiras de restritores pode ser explicado por instabilidade durante os experimentos, que foram refeitos sem apresentar melhora nos resultados. Nota-se, porém, um melhor desempenho para o mancal com três carreiras de restritores do que para um mancal com uma ou duas carreiras.

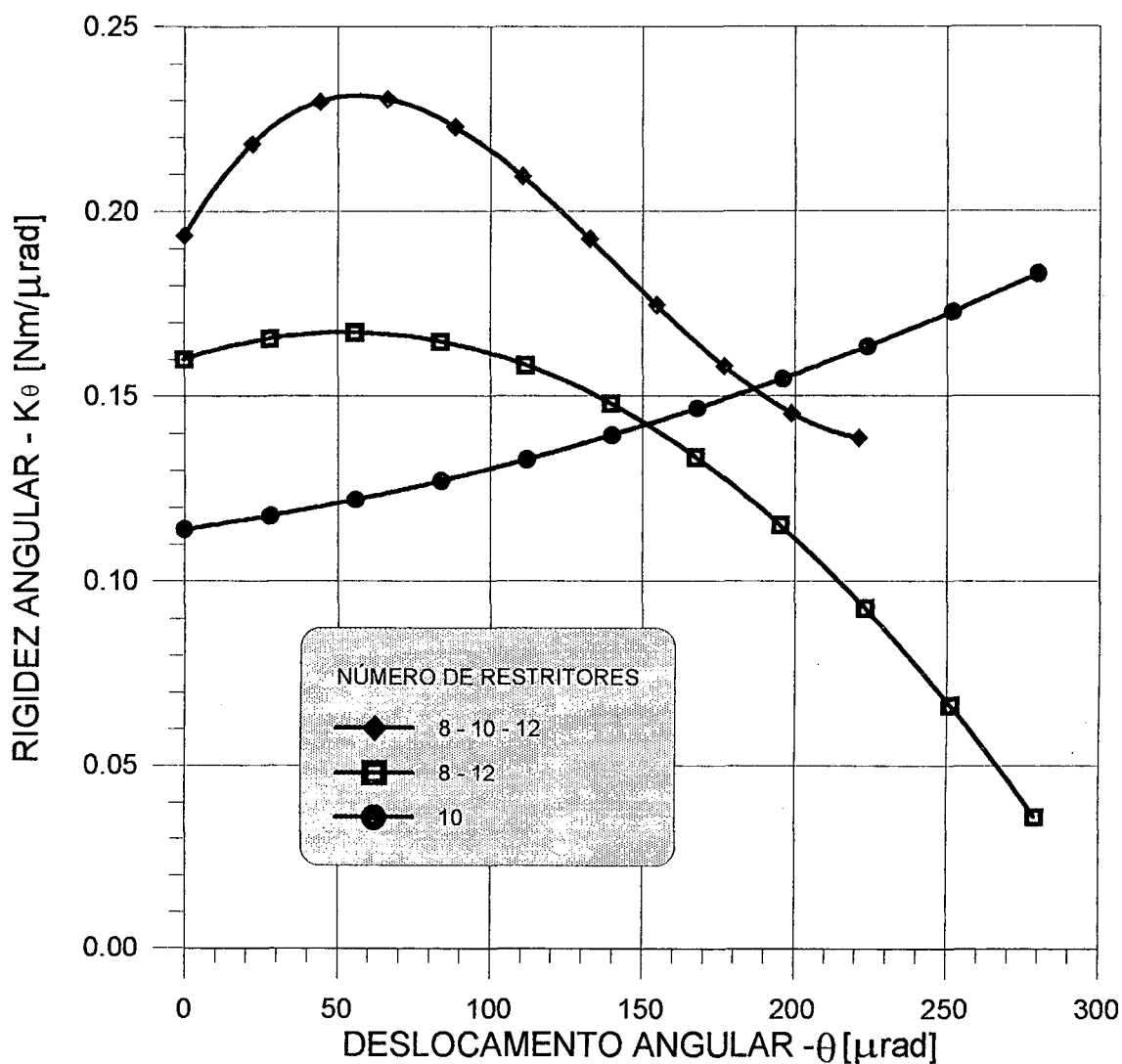


Figura 7.22 - Rigidez angular em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 8-10-12 restritores.

Comentário

Na configuração de três carreiras de restritores o mancal apresentou a melhor rigidez. O comportamento da curva de rigidez para o mancal com uma carreira de 10 restritores é devido a erros aleatórios na curva de capacidade de carga de momento que mudam o aspecto da derivada. No entanto, na figura 7.21 pode-se verificar a quase linearidade da curva em questão, que resultaria numa rigidez constante ao longo da faixa de operação.

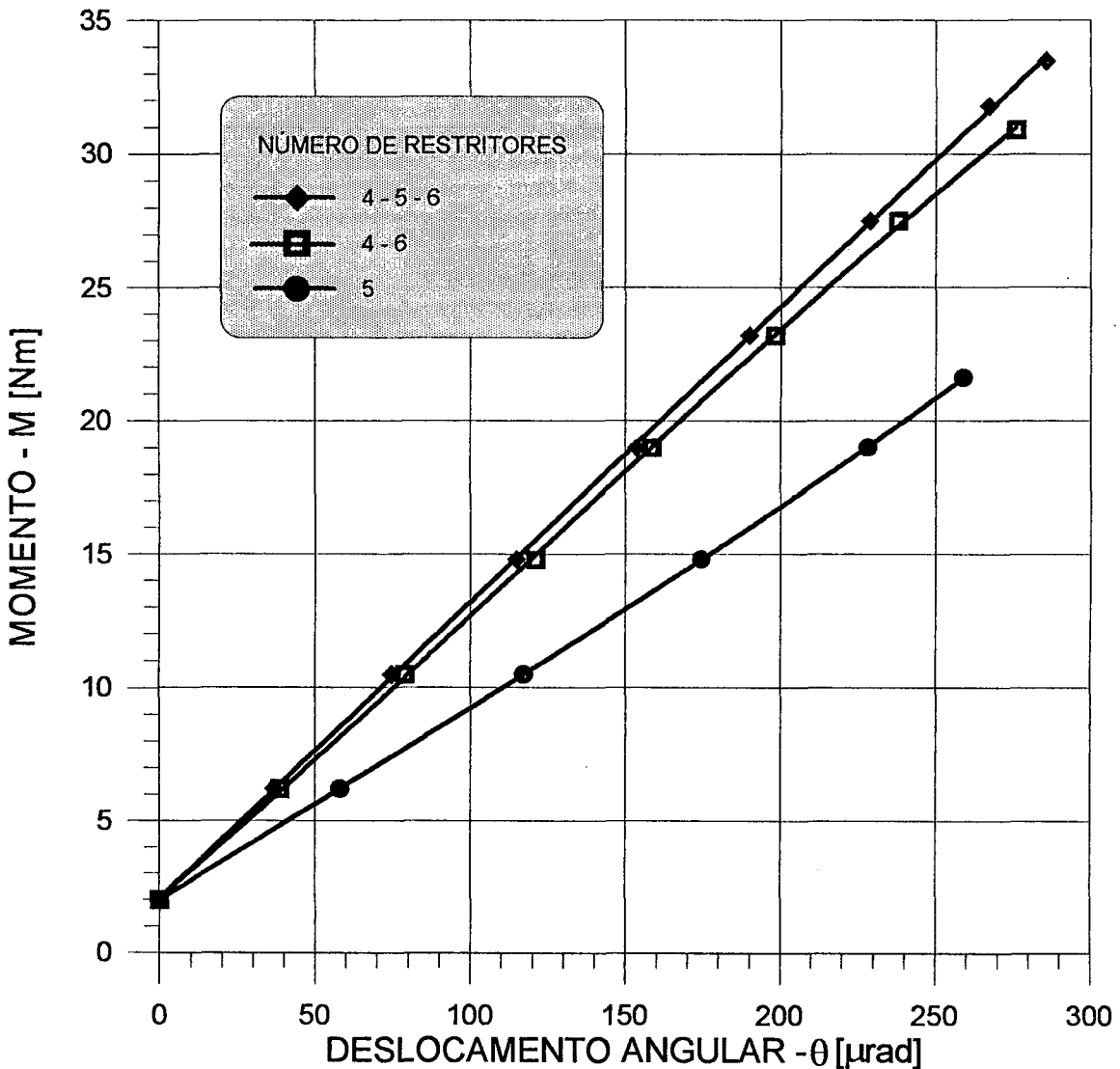


Figura 7.23 - Capacidade de carga de momento em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 4-5-6 restritores.

Comentário

Mais uma vez se repete o comportamento do mancal para o qual se verifica pouca diferença em relação ao de duas ou três carreiras de restritores. Invariavelmente, o mancal com uma carreira de restritores apresenta o pior resultado.

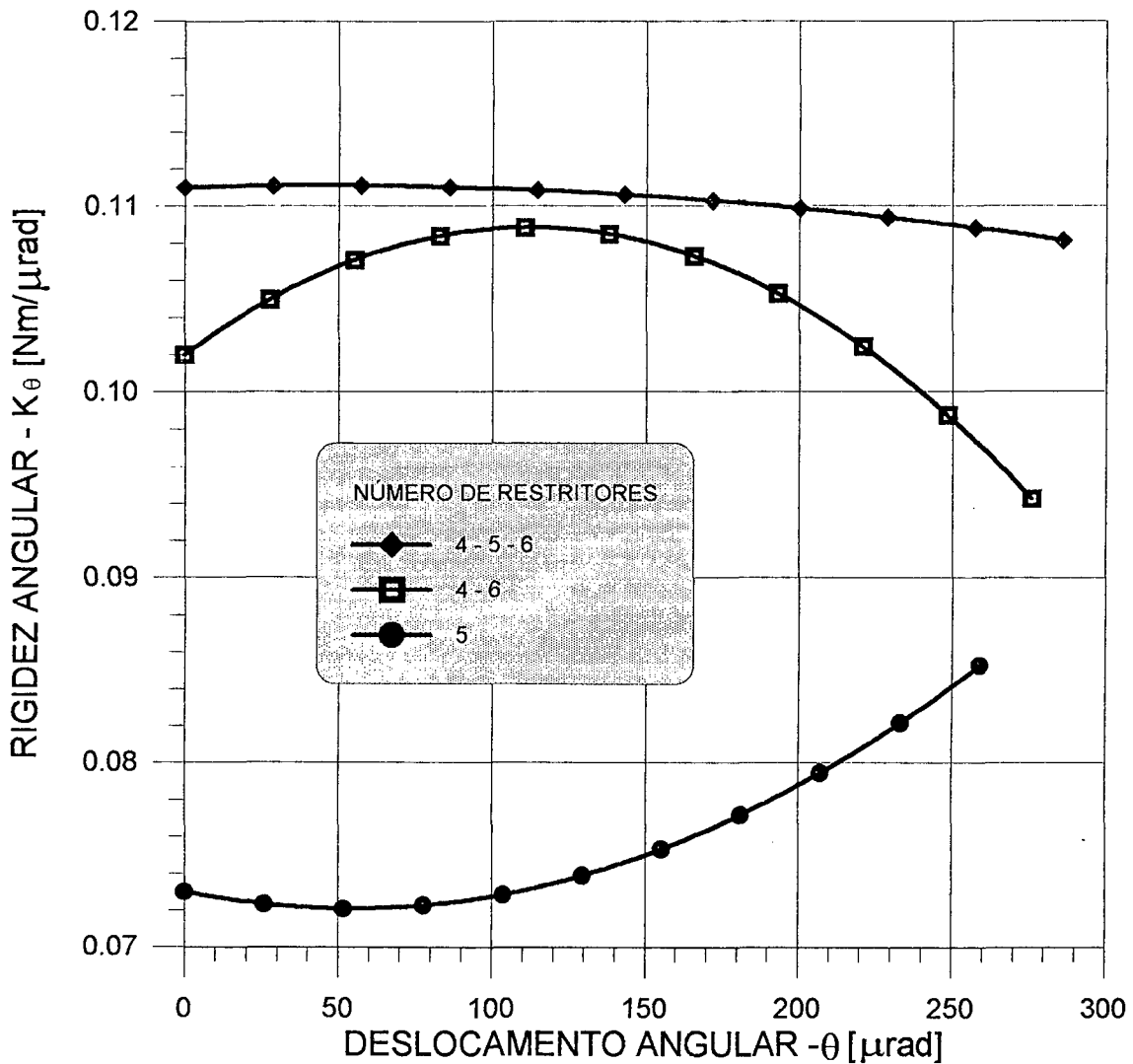


Figura 7.24 - Rigidez angular em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 4-5-6 restritores.

Comentário

Analisando a ordem de grandeza da rigidez em questão para as três curvas apresentadas, pode-se considerar que a rigidez é praticamente constante ao longo de toda faixa de operação do mancal.

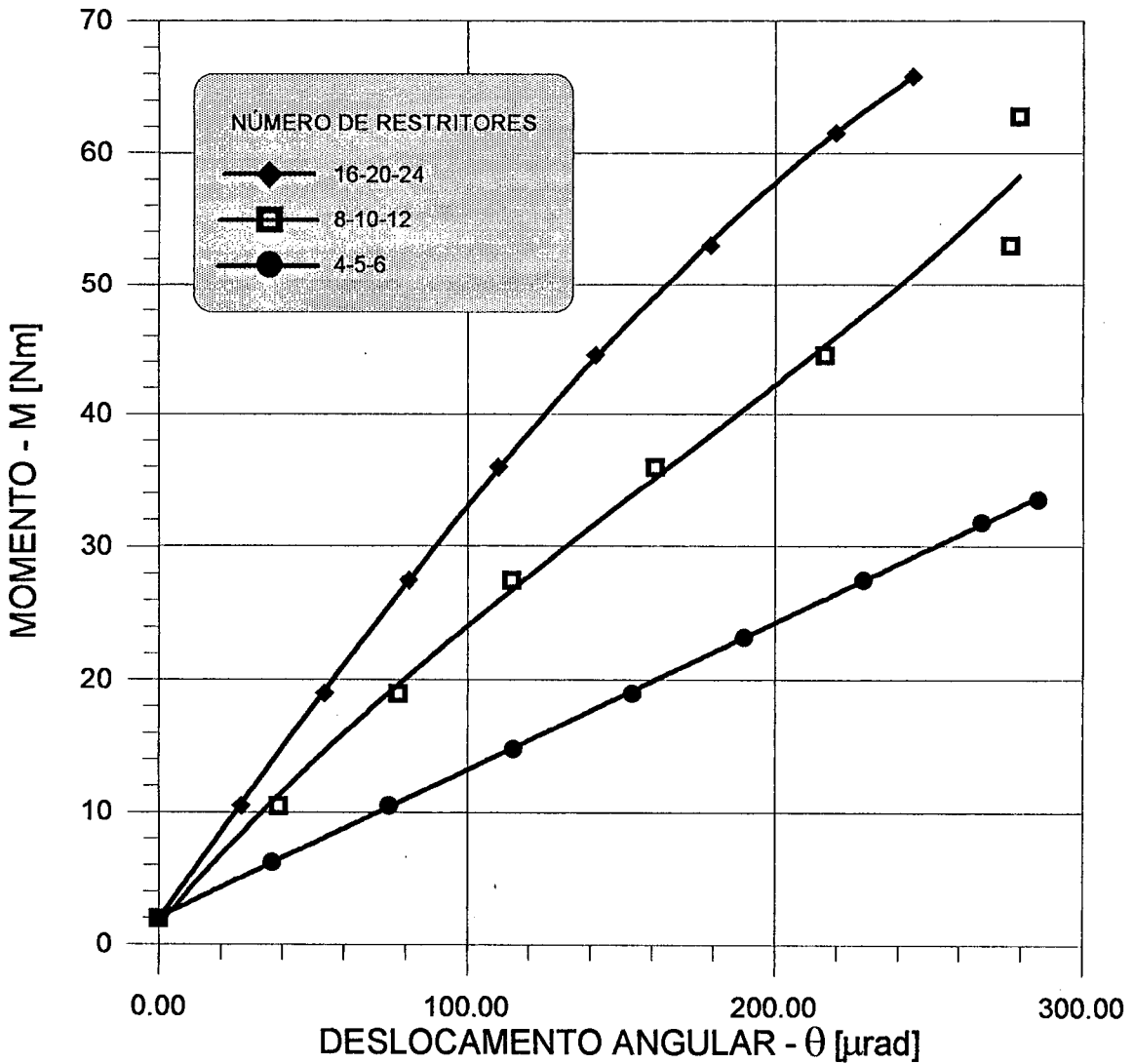


Figura 7.25 - Capacidade de carga de momento em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com três carreiras e diferentes números de restritores.

Comentário

Está claramente representada neste gráfico a tendência do mancal, com mais restritores por carreira, ter um desempenho superior ao do mancal com menor número de restritores por carreira. A desvantagem, no entanto, é o maior consumo de ar.

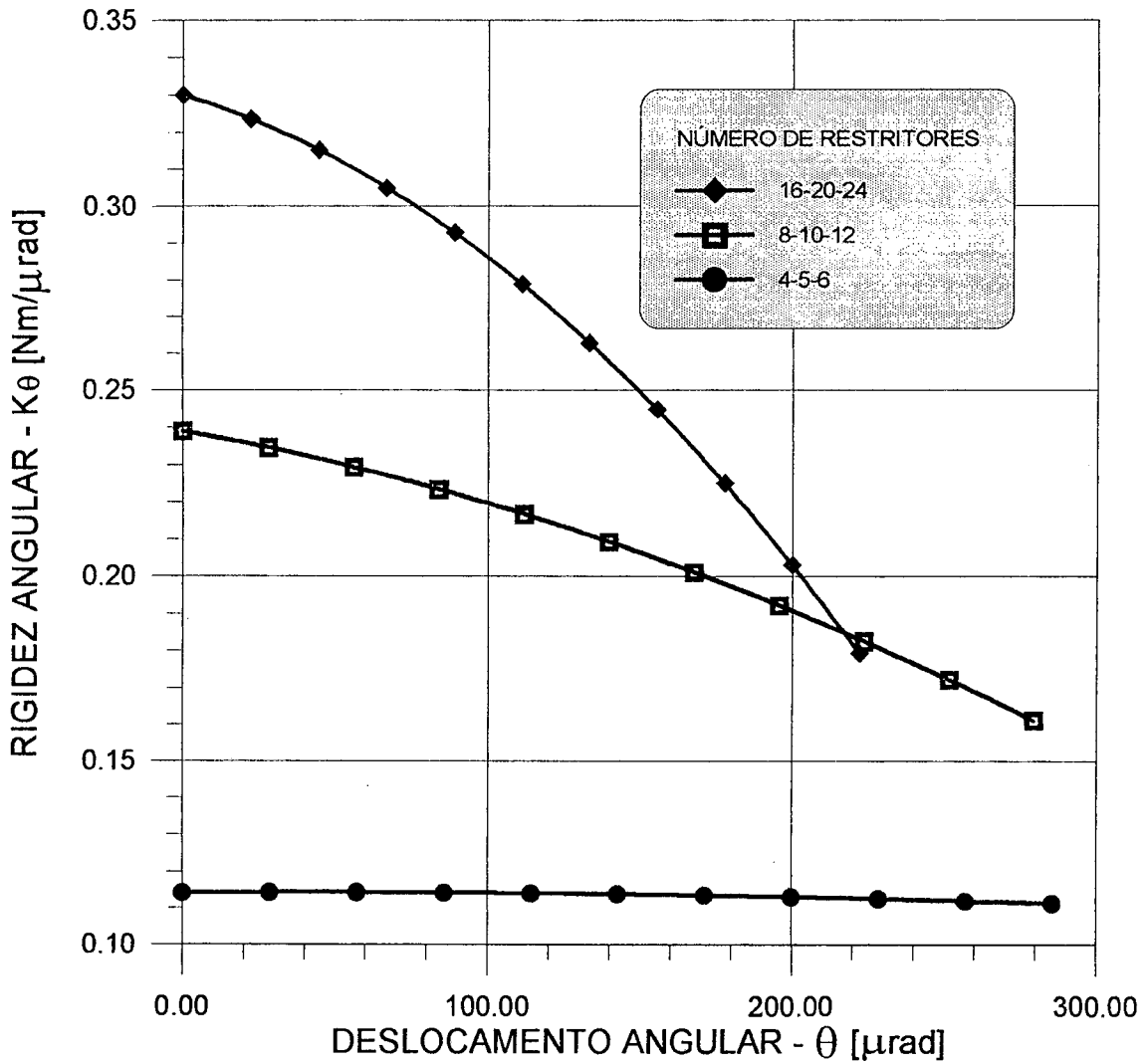


Figura 7.26 - Rigidez angular em função do deslocamento angular do conjunto eixo/esfera, para o mancal com três carreiras e diferentes números de restritores.

Comentário

Verifica-se o melhor desempenho do mancal com maior número de restritores por carreira. No caso do mancal com menor número de restritores (4-5-6), a rigidez é constante ao longo da faixa de operação.

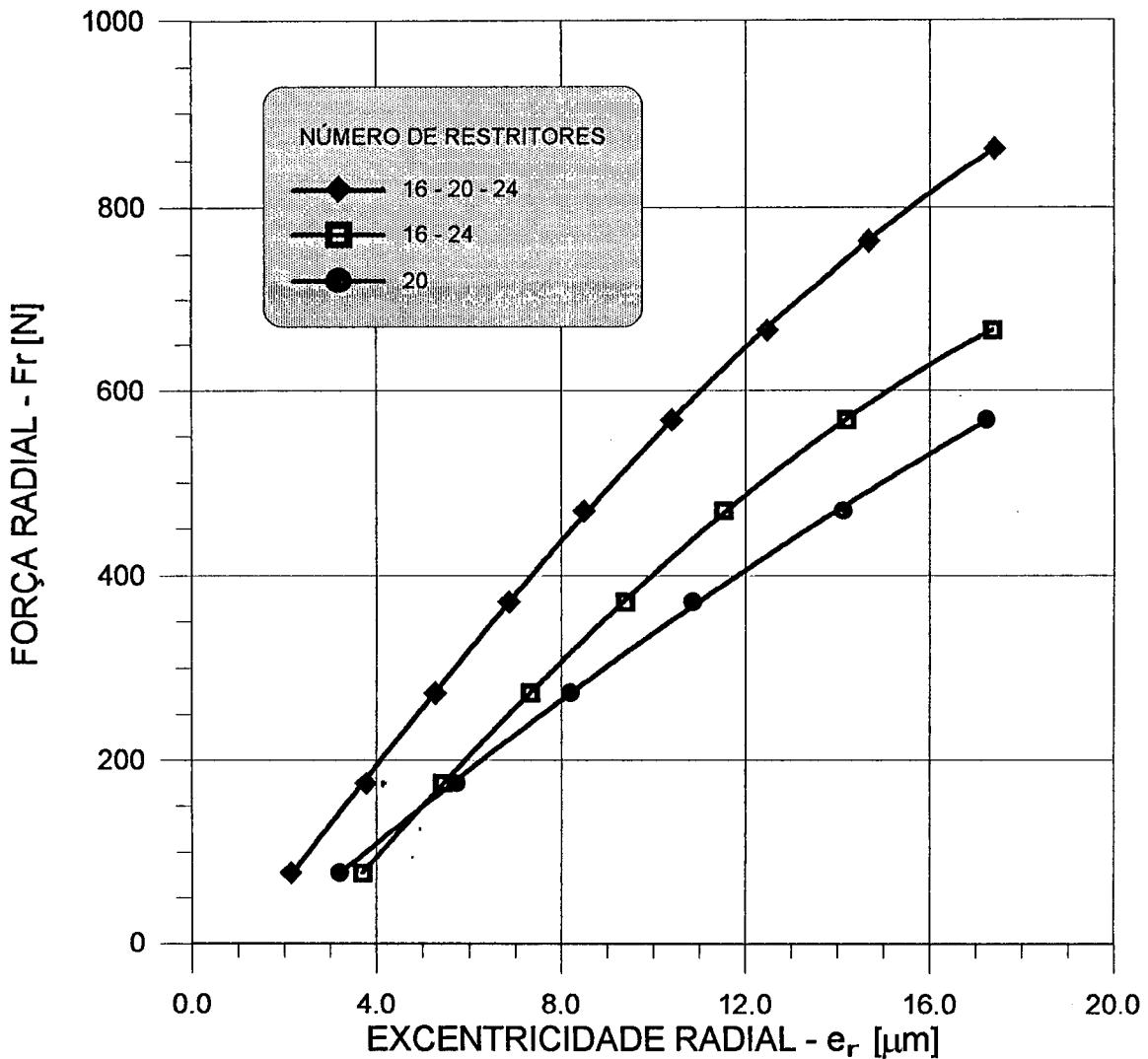


Figura 7.27 - Capacidade de carga radial em função da excentricidade radial, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 16-20-24 restritores.

Comentário

Destaca-se o mancal configurado com três carreiras de restritores por apresentar uma maior capacidade de carga radial. À medida que o número de carreiras cai, a capacidade de carga também é diminuída.

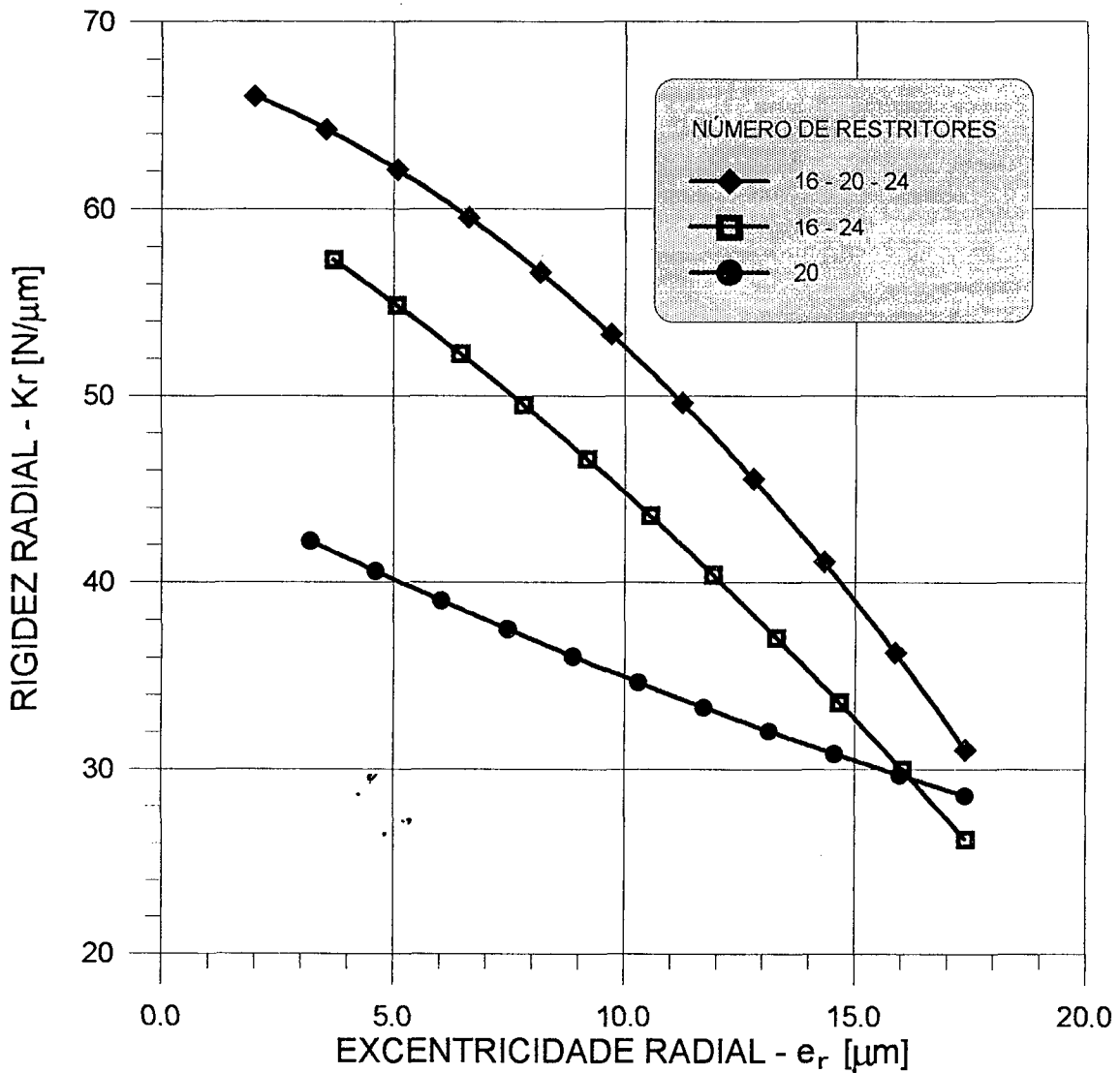


Figura 7.28 - Rigidez radial em função da excentricidade radial, para o mancal com uma, duas e três carreiras com 16-20-24 restritores.

Comentário

Como no caso da capacidade de carga radial, a rigidez apresenta o mesmo comportamento. O mancal com três carreiras tem o melhor desempenho, e à medida que se diminui o número de carreiras para dois e um, a rigidez cai proporcionalmente.

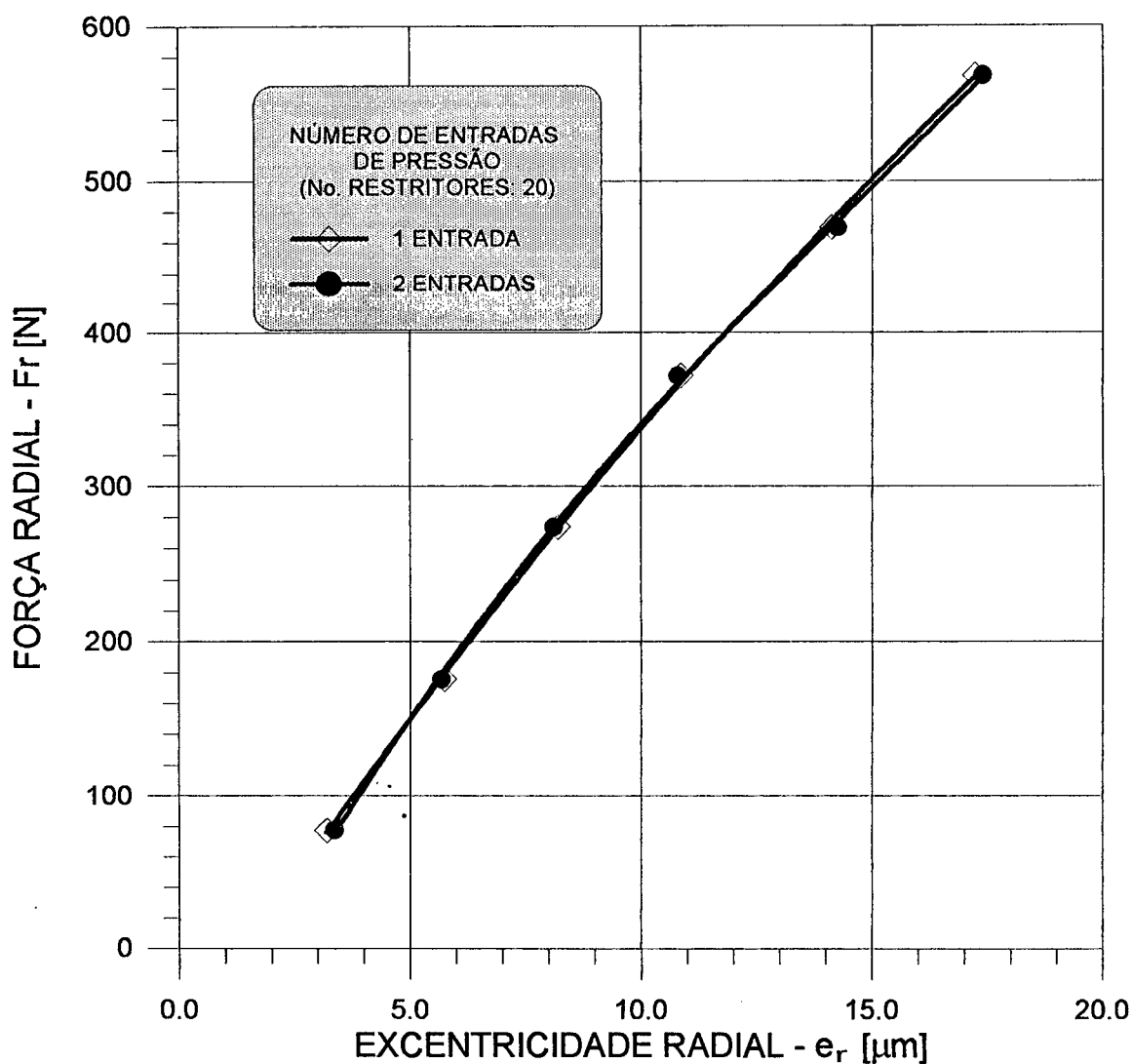


Figura 7.29 - Capacidade de carga radial em função da excentricidade radial, para o mancal com uma carreira de 20 restritores, alimentado por uma e duas entradas de ar.

Comentário

Não há nenhuma diferença em alimentar o mancal com uma ou duas entradas de ar. Este gráfico prova que as perdas internas são inteiramente desprezíveis.

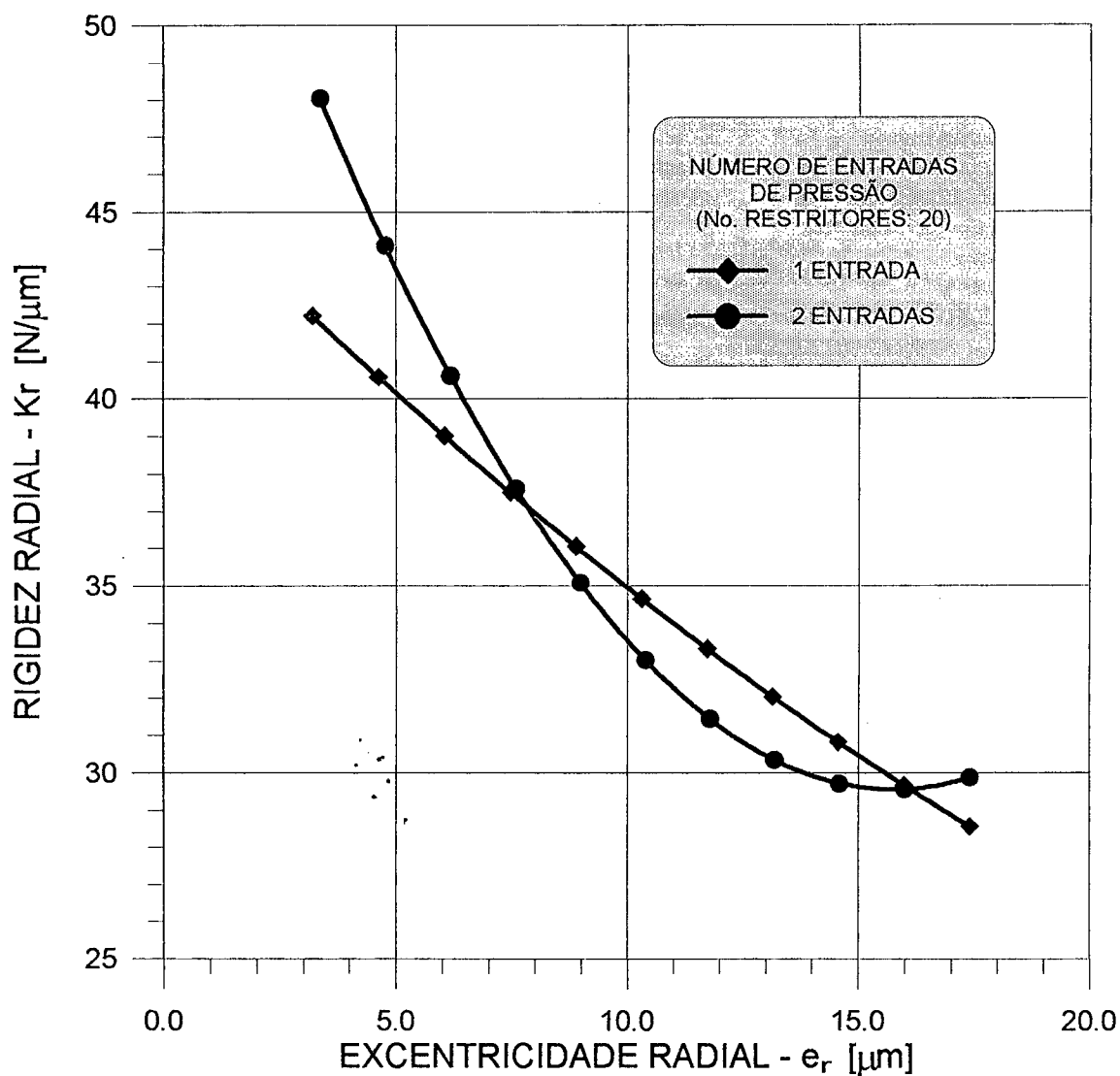


Figura 7.30 - Rigidez radial em função da excentricidade radial, para o mancal com uma carreira de 20 restritores, alimentado por uma e duas entradas de ar.

Comentário

Desconsiderando as diferenças de rigidez causadas pelos erros inerentes ao experimento, pode-se afirmar que o comportamento do mancal não é afetado pelo número de entradas de ar utilizadas.

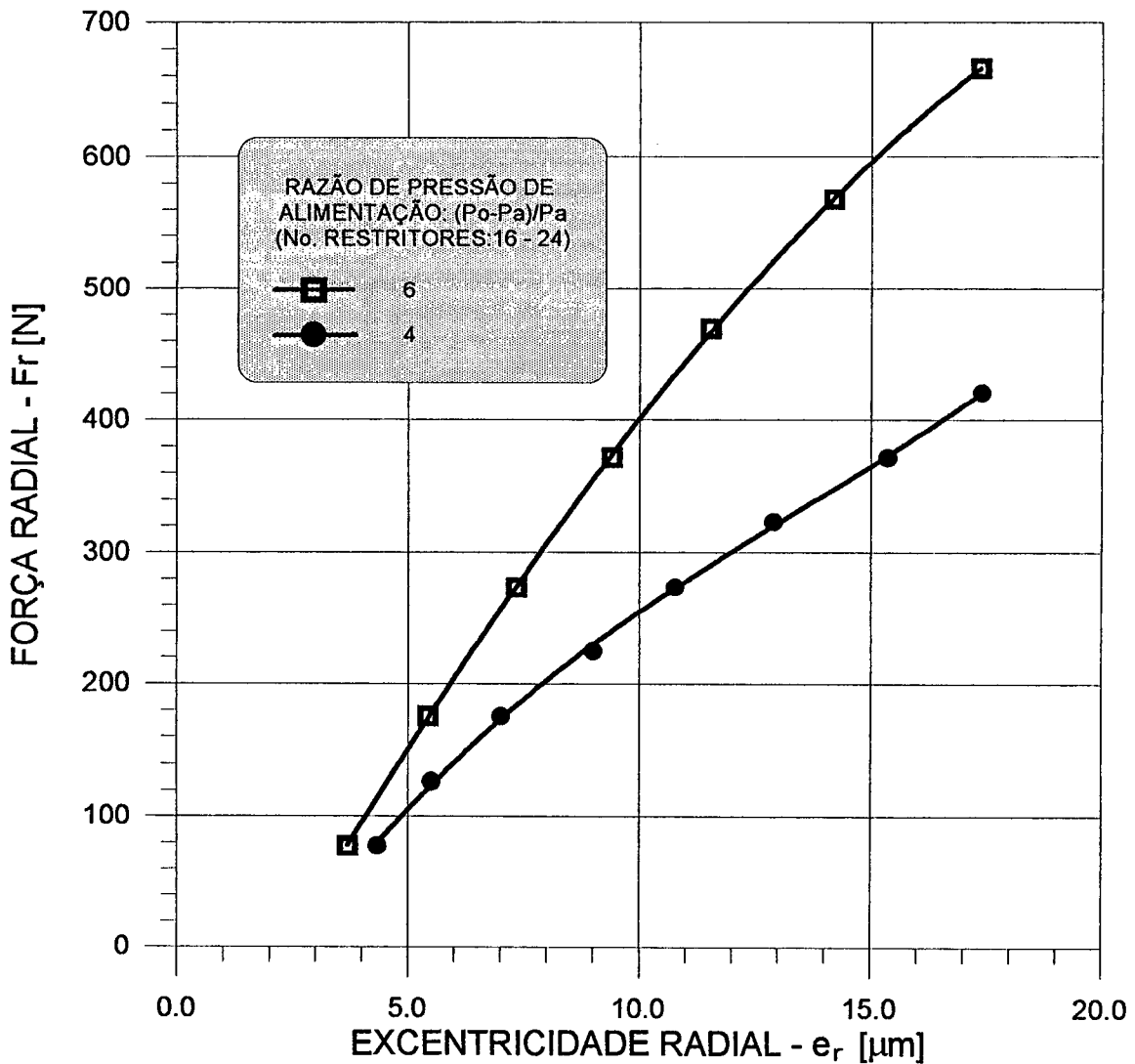


Figura 7.31 - Capacidade de carga radial em função da excentricidade radial, para o mancal com duas carreiras de 16-24 restritores, para razões de pressão de alimentação igual a 4 e a 6.

Comentário

Este gráfico ilustra a influência da pressão de alimentação no comportamento do mancal. Quanto maior for a pressão maior será sua capacidade de carga.

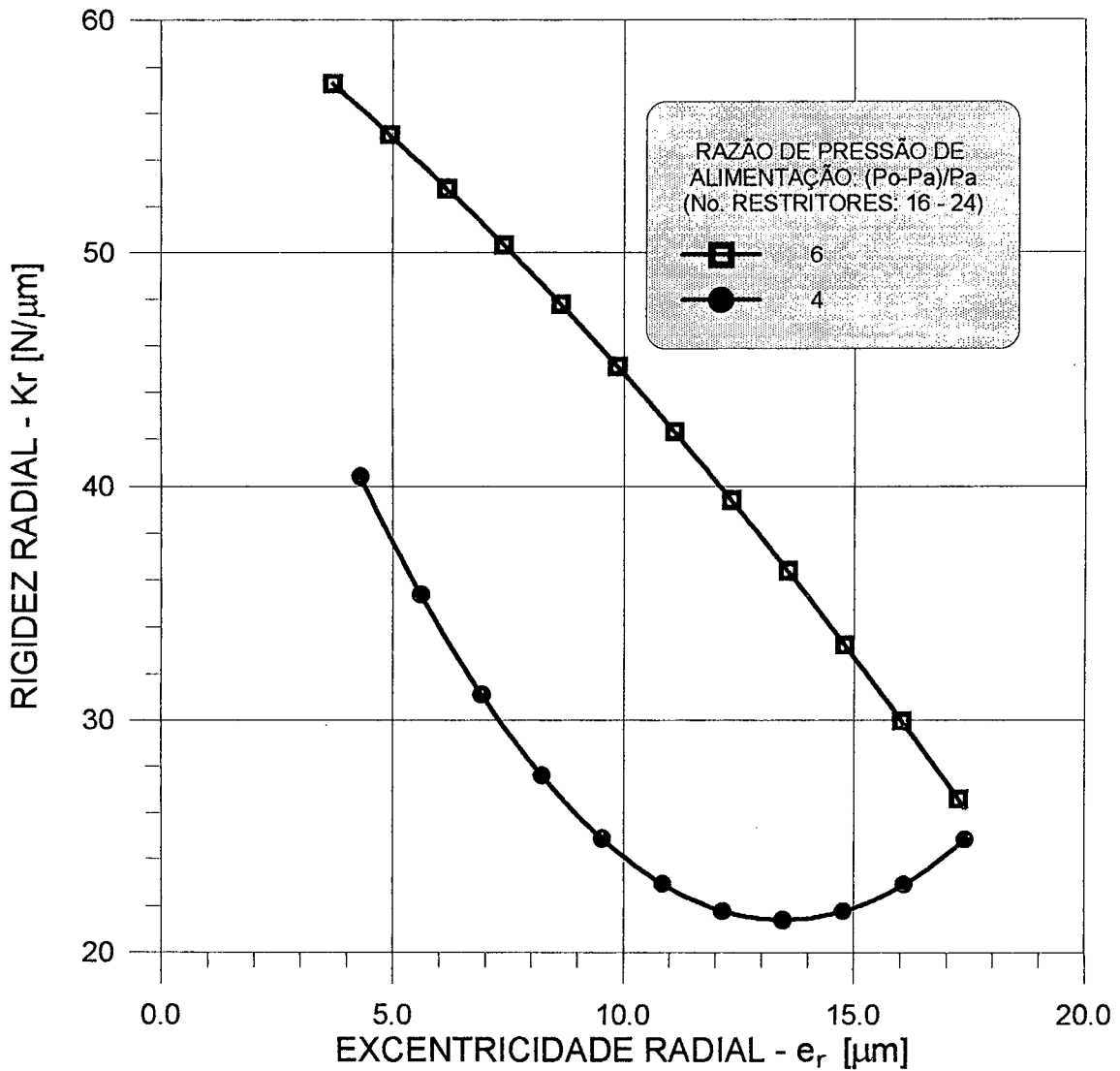


Figura 7.32 - Rigidez radial em função da excentricidade radial, para o mancal com duas carreiras de 16-24 restritores, para razões de pressão de alimentação igual a 4 e 6.

Comentário

O mancal apresenta maior rigidez quando a pressão de alimentação é maior. O comportamento da curva de rigidez do mancal com $(P_o - P_a)/P_a = 4$ pode ser explicado pelas incertezas geradas durante o processamento dos dados e durante o ajuste da curva polinomial.

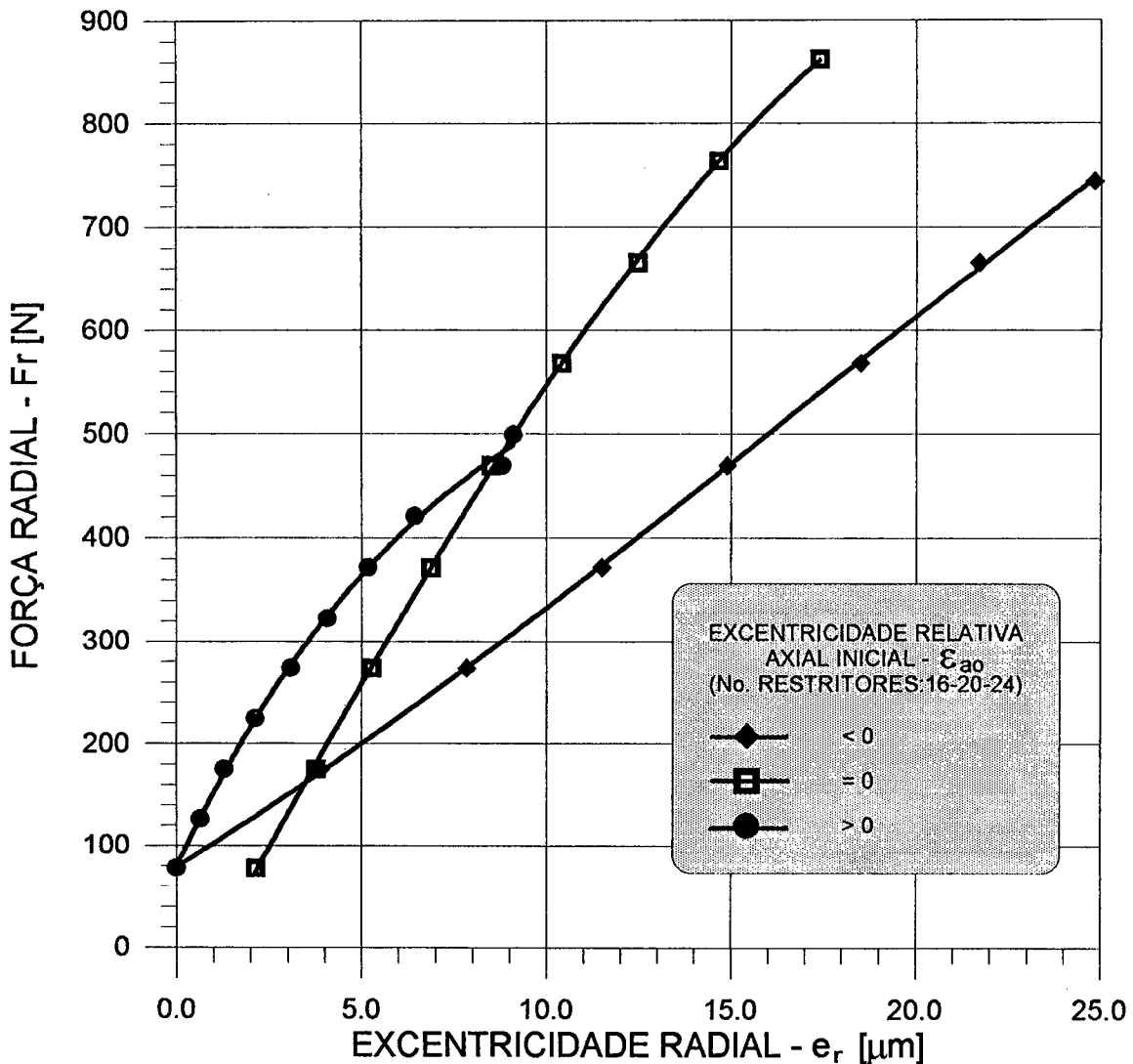


Figura 7.33 - Capacidade de carga radial em função da excentricidade radial, para o mancal com três carreiras de 16-20-24 restritores, ajustado para excentricidade relativa axial inicial (ϵ_{ao}) menor, igual e maior do que zero.

Comentário

A melhor condição de capacidade de carga radial foi obtida com $\epsilon_{ao} > 0$, porém ao longo de um faixa de operação pequena, e com capacidade de carga máxima baixa. Com $\epsilon_{ao} = 0$, obteve-se uma boa capacidade de carga ao longo de uma faixa de operação maior. O pior resultado ficou por conta de $\epsilon_{ao} < 0$.

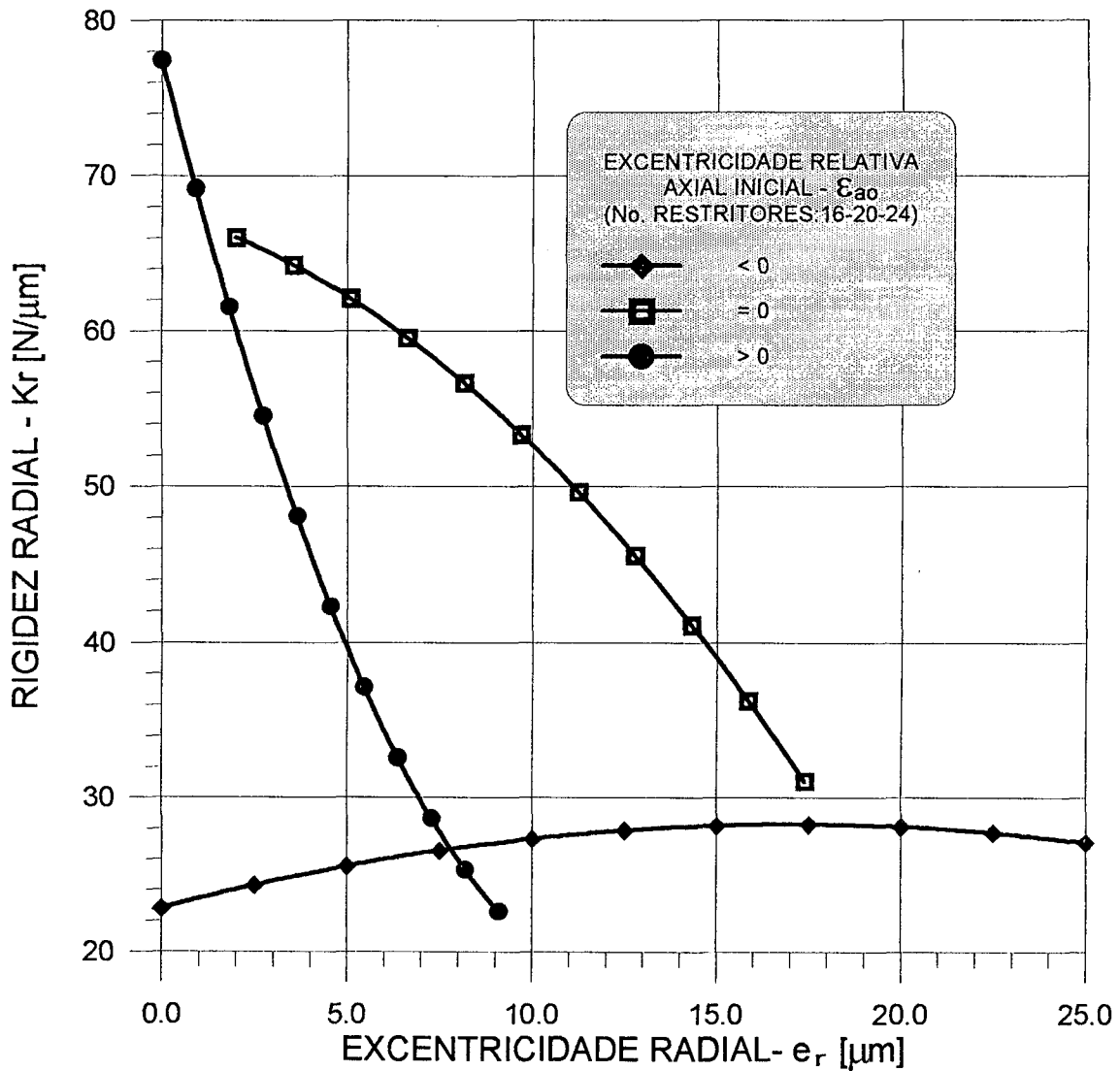


Figura 7.34 - Rigidez radial em função da excentricidade radial, para o mancal com três carreiras de 16-20-24 restritores, ajustado para excentricidade relativa axial inicial (ϵ_{ao}) menor, igual e maior do que zero.

Comentário

A menor rigidez foi obtida para $\epsilon_{ao} < 0$, a qual pode ser considerada constante ao longo da faixa de operação. Já a configuração $\epsilon_{ao} = 0$ apresentou a melhor rigidez, deixando a situação intermediária para o caso de $\epsilon_{ao} > 0$.

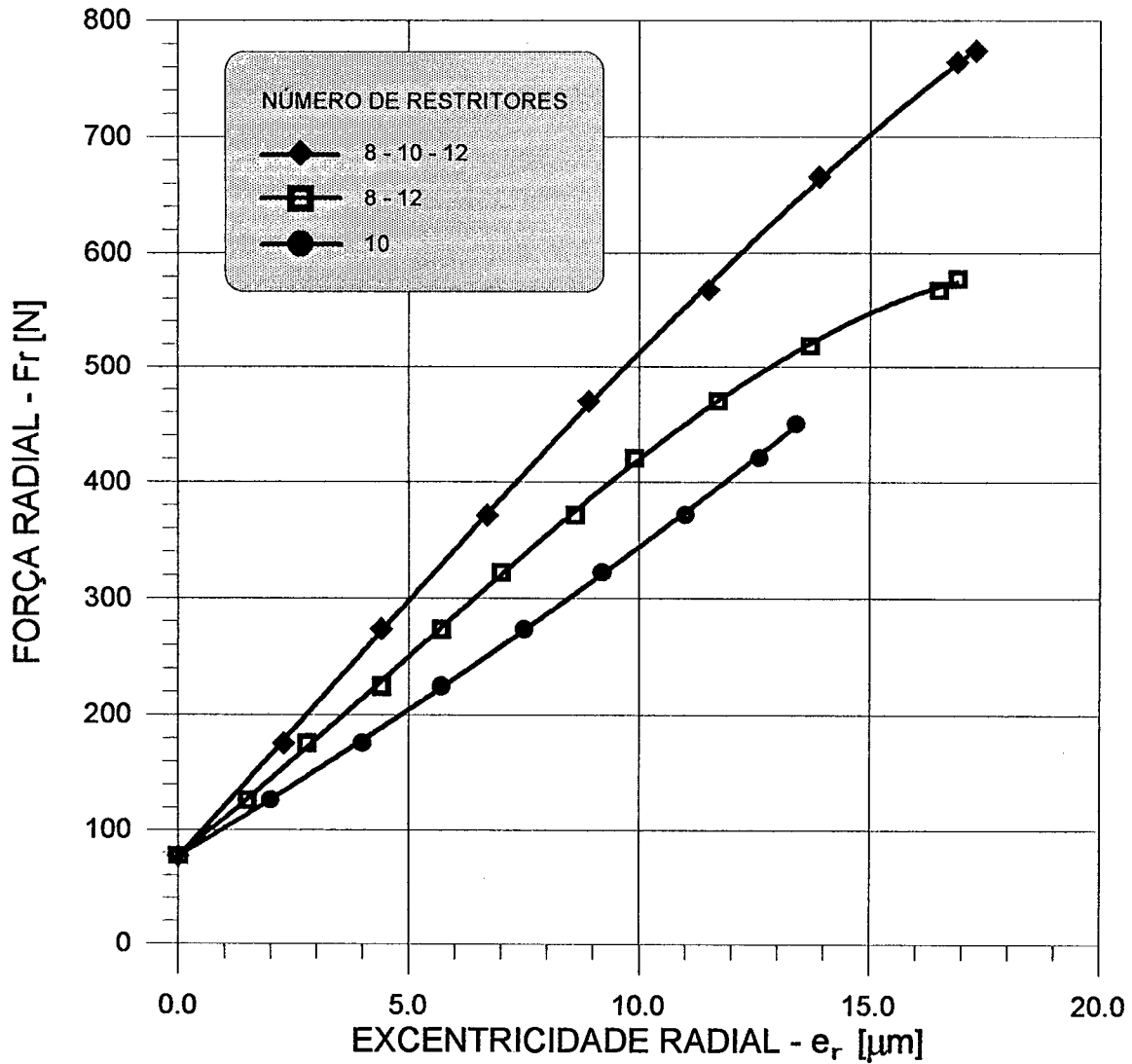


Figura 7.35 - Capacidade de carga radial em função da excentricidade radial, para o mancal com uma, duas e três carreiras de 8-10-12 restritores.

Comentário

O melhor desempenho em relação à capacidade de carga radial foi verificado no mancal com três carreiras de restritores. À medida que o número de carreiras foi diminuído, o desempenho foi também piorado. Assim, o mancal com duas carreiras de restritores apresentou um comportamento intermediário. Com uma, a capacidade de carga foi a menor.

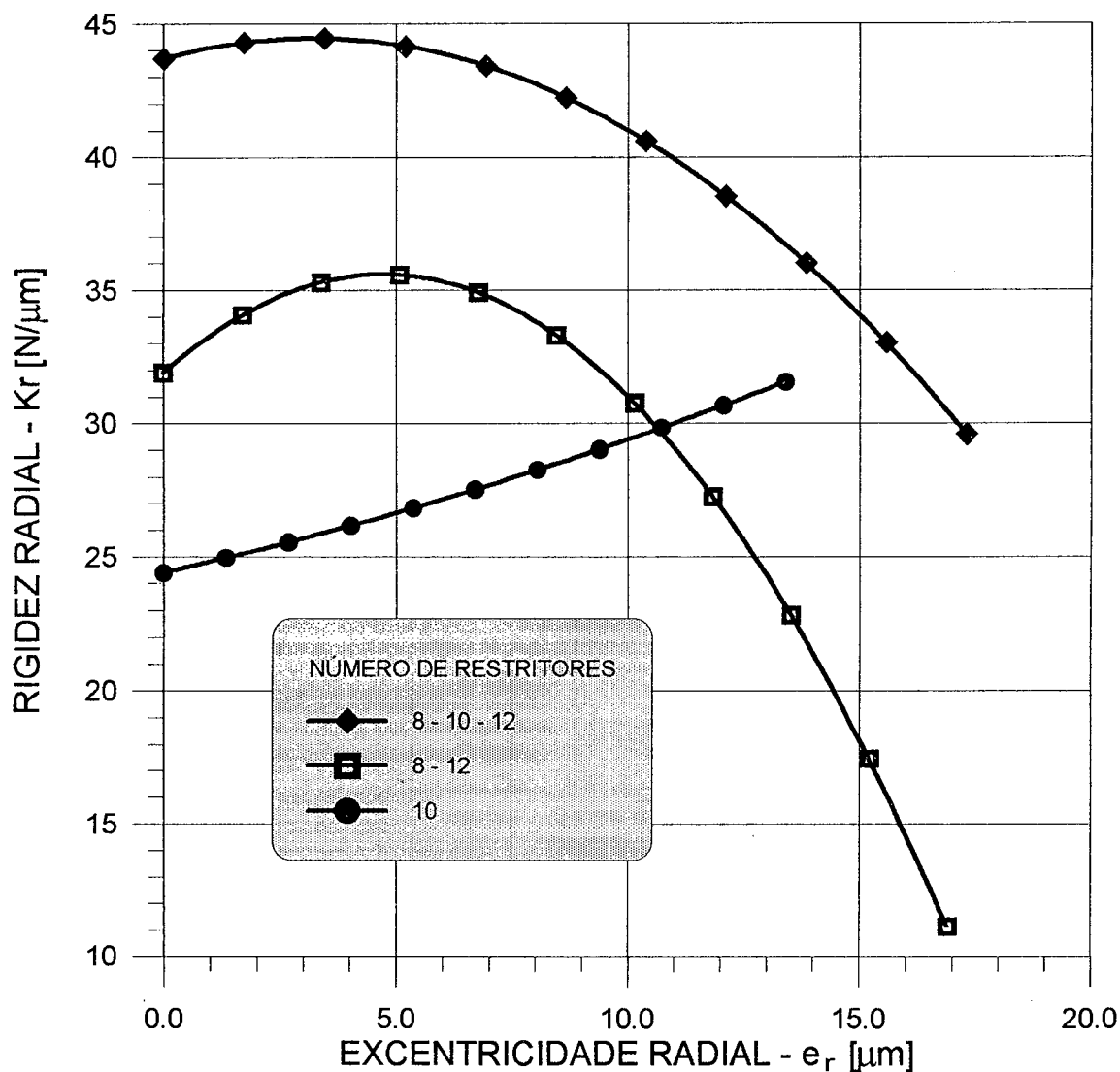


Figura 7.36 - Rigidez radial em função da excentricidade radial, para o mancal com uma, duas e três carreiras de 8-10-12 restritores.

Comentário

O mancal com três carreiras de restritores apresentou maior rigidez ao longo da faixa de operação. Com duas carreiras, a rigidez foi menor. O comportamento da curva de rigidez do mancal com uma carreira de 10 restritores foi provavelmente causado pelos erros aleatórios, presentes nos pontos experimentais, utilizados para o ajuste da curva polinomial.

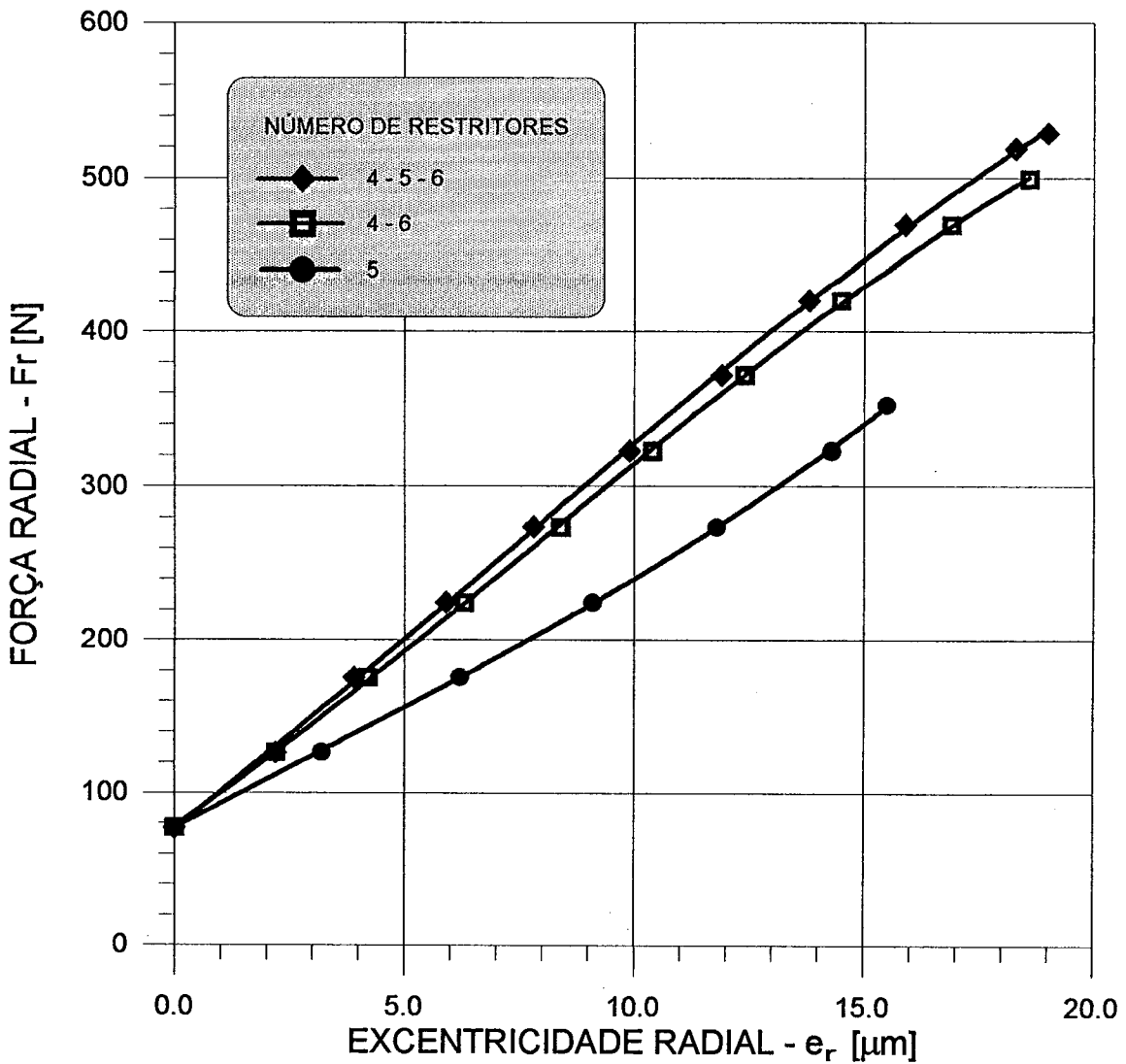


Figura 7.37 - Capacidade de carga radial em função da excentricidade radial, para o mancal com uma, duas e três carreiras de 4-5-6 restritores.

Comentário

Devido ao pequeno número de restritores neste experimento, o mancal não apresenta uma diferença acentuada na capacidade de carga com duas ou três carreiras de restritores. A menor capacidade de carga é encontrada com uma carreira de 5 restritores.

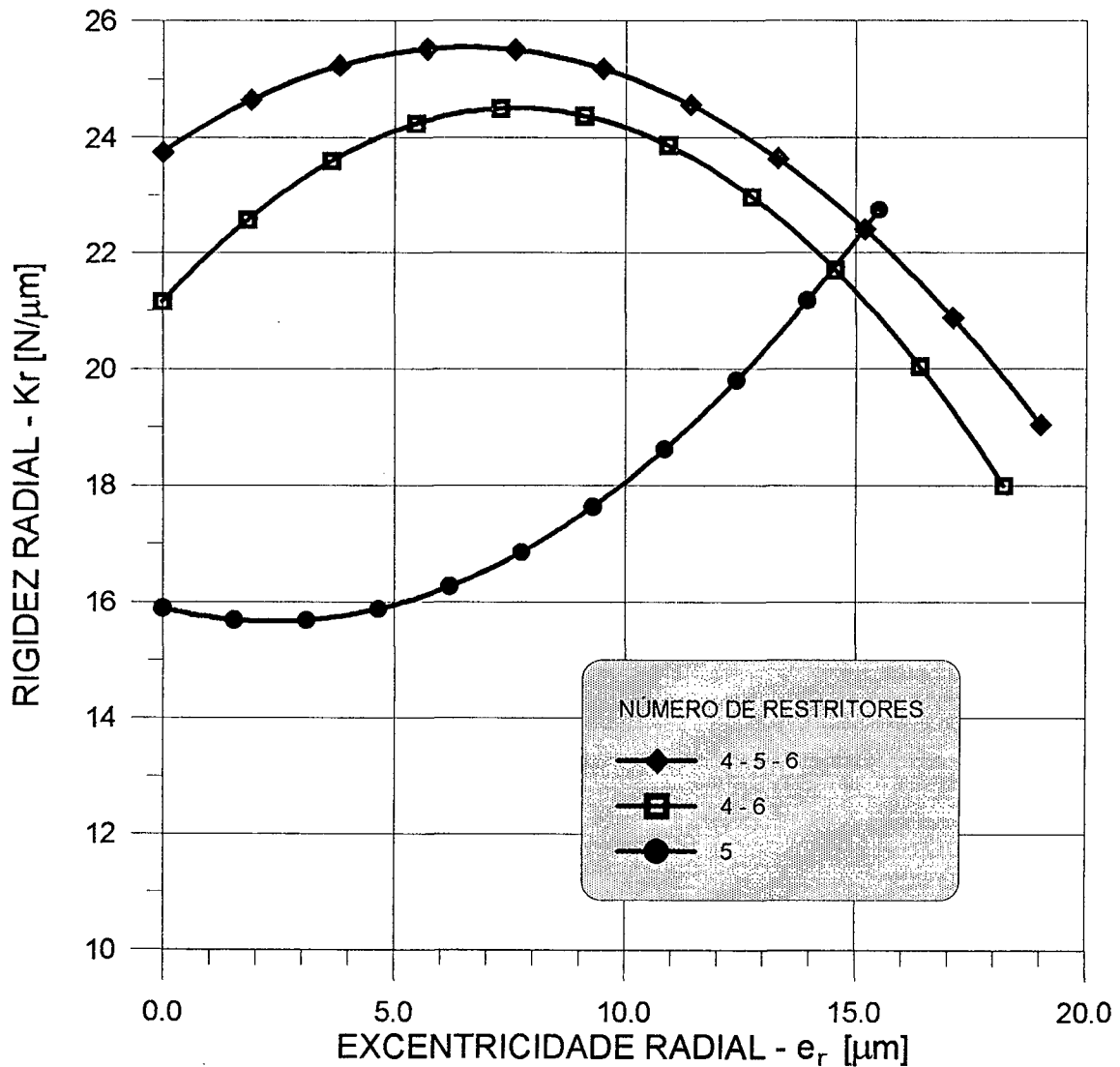


Figura 7.38 - Rigidez radial em função da excentricidade radial, para o mancal com uma, duas e três carreiras de 4-5-6 restritores.

Comentário

Uma rigidez radial levemente maior pode ser verificada no mancal com três carreiras de 4-5-6 restritores, em relação ao caso de duas carreiras. A rigidez é a menor para uma carreira de 5 restritores, e o comportamento não característico da curva pode ser explicado pela grande sensibilidade que a rigidez apresenta por ser a derivada da curva de capacidade de carga, a qual tem erros embutidos em si.

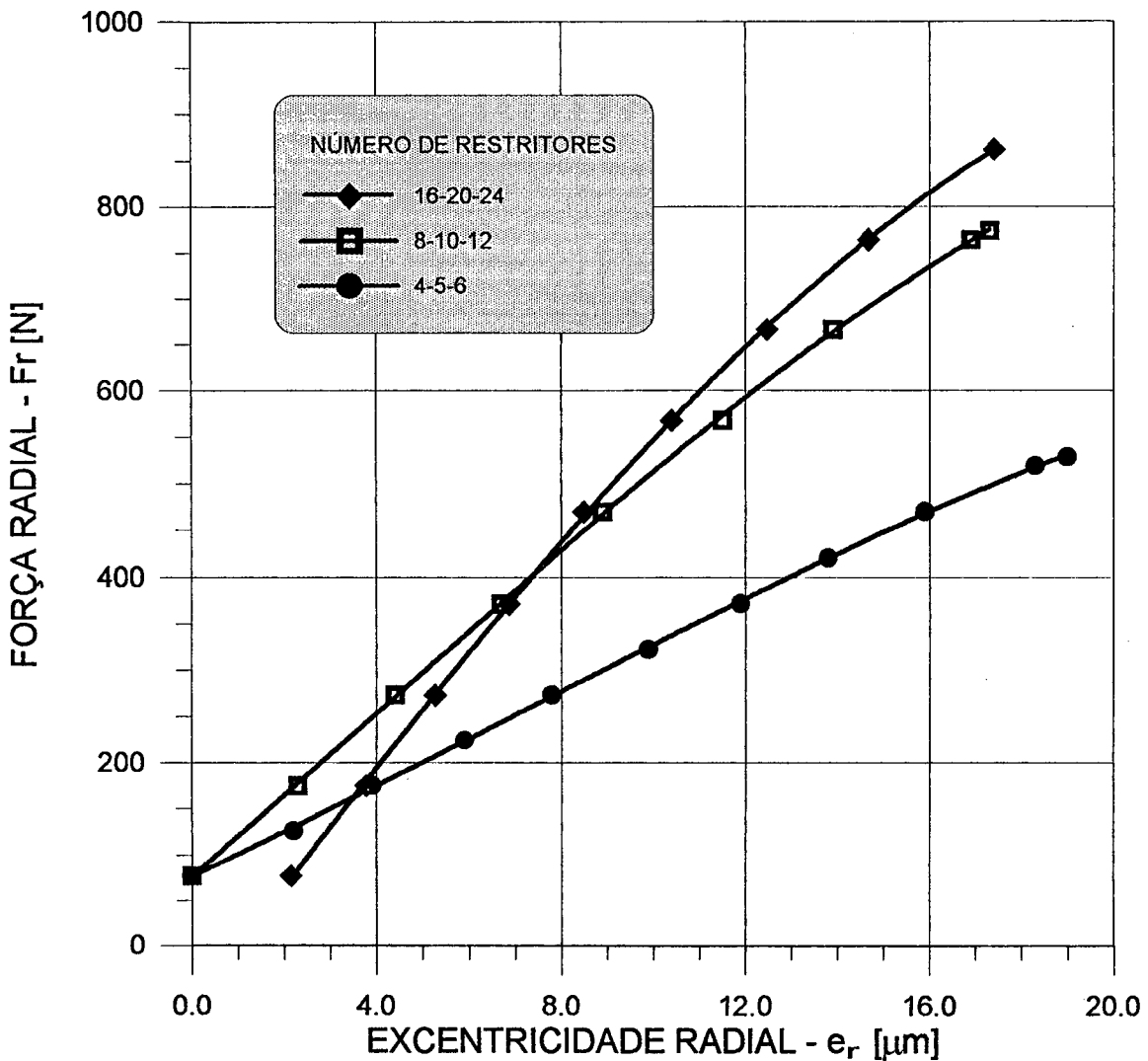


Figura 7.39 - Capacidade de carga radial em função da excentricidade radial, para o mancal com três carreiras com diferentes números de restritores.

Comentário

Analisando o gráfico acima, pode-se dizer que o mancal com 16-20-24 restritores tem uma capacidade de carga radial levemente superior à do mancal com 8-10-12 restritores. Levando-se em consideração o consumo de ar, há vantagem para o caso de 8-10-12 restritores. Já o mancal com 4-5-6 restritores apresenta a menor capacidade de carga.

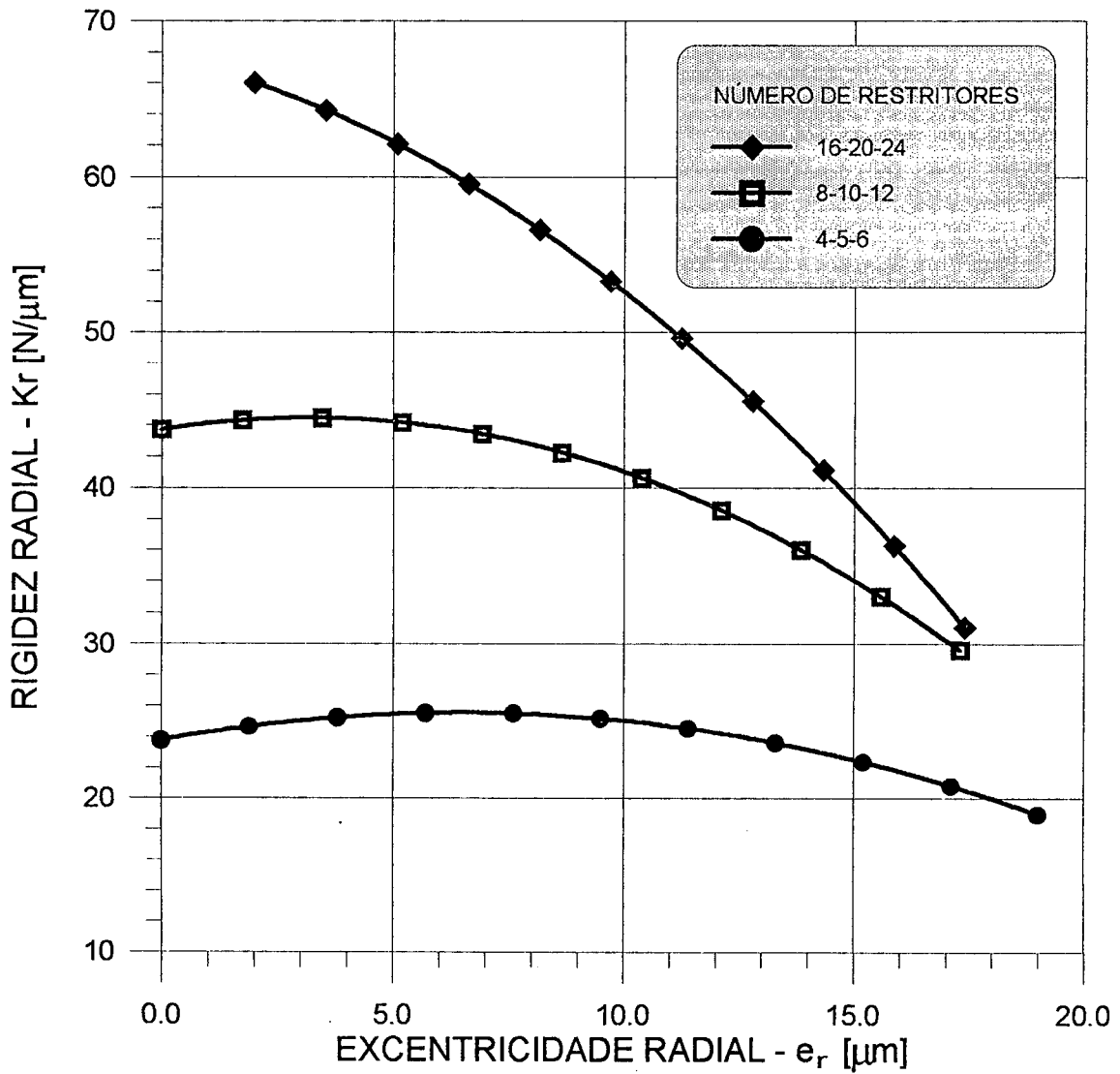


Figura 7.40 - Rigidez radial em função da excentricidade radial, para o mancal com três carreiras com diferentes números de restritores.

Comentário

O mancal, com maior número de restritores (16-20-24), apesar de ter um maior consumo de ar, apresentou a maior rigidez radial. À medida que o número de restritores foi diminuído, a rigidez também diminuiu.

8. CONCLUSÕES

Este capítulo tem por objetivo apresentar as conclusões finais desta dissertação, e dar sugestões para futuros trabalhos. Serão apresentadas conclusões sobre os aspectos mais relevantes e que mereçam um fecho que não tenha sido feito no decorrer dos capítulos anteriores. Para facilitar a exposição das idéias, decidiu-se subdividir este capítulo em sub-ítem que serão mostrados a seguir.

8.1 Sobre o Projeto

8.1.1 Mancal esférico

A utilização de semi-esferas, para a fabricação de mancais aerostáticos, tem uma vantagem. Duas superfícies esféricas (uma côncava, outra convexa) podem ser lapidadas uma contra a outra, gerando uma folga uniforme entre si na ordem de grandeza do abrasivo utilizado. Esta folga é resultado de uma diferença no raio das duas superfícies e é ela que será preenchida por ar sob pressão, causando o efeito aerostático, ou seja, permitindo movimento relativo entre as superfícies, sem contato das mesmas. Outra vantagem é a compensação de desalinhamentos da montagem. As semi-esferas se ajustam perfeitamente na presença deste tipo de erro, sem prejudicar o comportamento do mancal.

Uma desvantagem, no entanto, é a relação entre a capacidade de carga e as dimensões do mancal, principalmente para cargas radiais e de momento. Outras formas construtivas de mancais são muito mais compactas e apresentam maior capacidade de carga do que mancais esféricos. É o caso dos mancais cilíndrico-planos.

Outro aspecto negativo, relacionado aos mancais esféricos, é a quase inexistência de teorias que expliquem o comportamento deste tipo de mancais. Do ponto de vista da mecânica dos fluidos, principalmente no que se refere aos restritores e à não uniformidade da folga durante a aplicação de cargas, pouco se sabe ou está comprovado. A maioria das teorias trata de casos menos complexos, como mancais cilíndricos ou planos, que apresentam a vantagem da simetria

geométrica e de distribuição dos restritores.

Para dar um passo em direção à solução do problema da falta de teorias para mancais esféricos, o LMP, em conjunto com o setor de mecânica dos fluidos, do Laboratório de Ciências Térmicas da UFSC, iniciou o desenvolvimento de um estudo científico sobre o assunto. Este está embasado por dados experimentais e visa descrever o comportamento do fluido dentro da folga e através dos restritores. Um programa de computador já está em funcionamento, a partir do qual pode-se obter um gráfico da distribuição de pressão segundo diferentes direções. Este trabalho permite a análise da influência dos mais diversos parâmetros no comportamento do mancal, tais como diâmetro e tipo de restritores, folga, dentre outros. Esta idéia não pôde ser finalizada antes da conclusão desta dissertação, porém alguns resultados foram obtidos, como mostrado nas figuras 8.1 e 8.2.

A figura 8.1 mostra a distribuição de pressão ao longo da circunferência que passa sobre os restritores, ou seja, para um ângulo ω variando de 0 a 2π . Pode-se observar que a pressão é máxima nos pontos onde se localizam os restritores e que esta cai gradativamente à medida em que se afasta deles. Não se sabe se o valor da pressão, indicado neste gráfico, é verdadeiro ou não. Deseja-se mostrar, apenas, que o programa utilizado tem um enorme potencial para auxiliar no projeto de mancais aerostáticos esféricos e, principalmente, para auxiliar a entender o comportamento do perfil de pressão dentro da fenda de ar.

A figura 8.2 mostra a distribuição de pressão ao longo do ângulo ϕ , que é tomado na direção da linha que une o pólo ao equador da semi-esfera. Também é possível verificar a localização dos pontos de pressão máxima sobre os restritores, o que confere com a situação apresentada na figura 8.1.

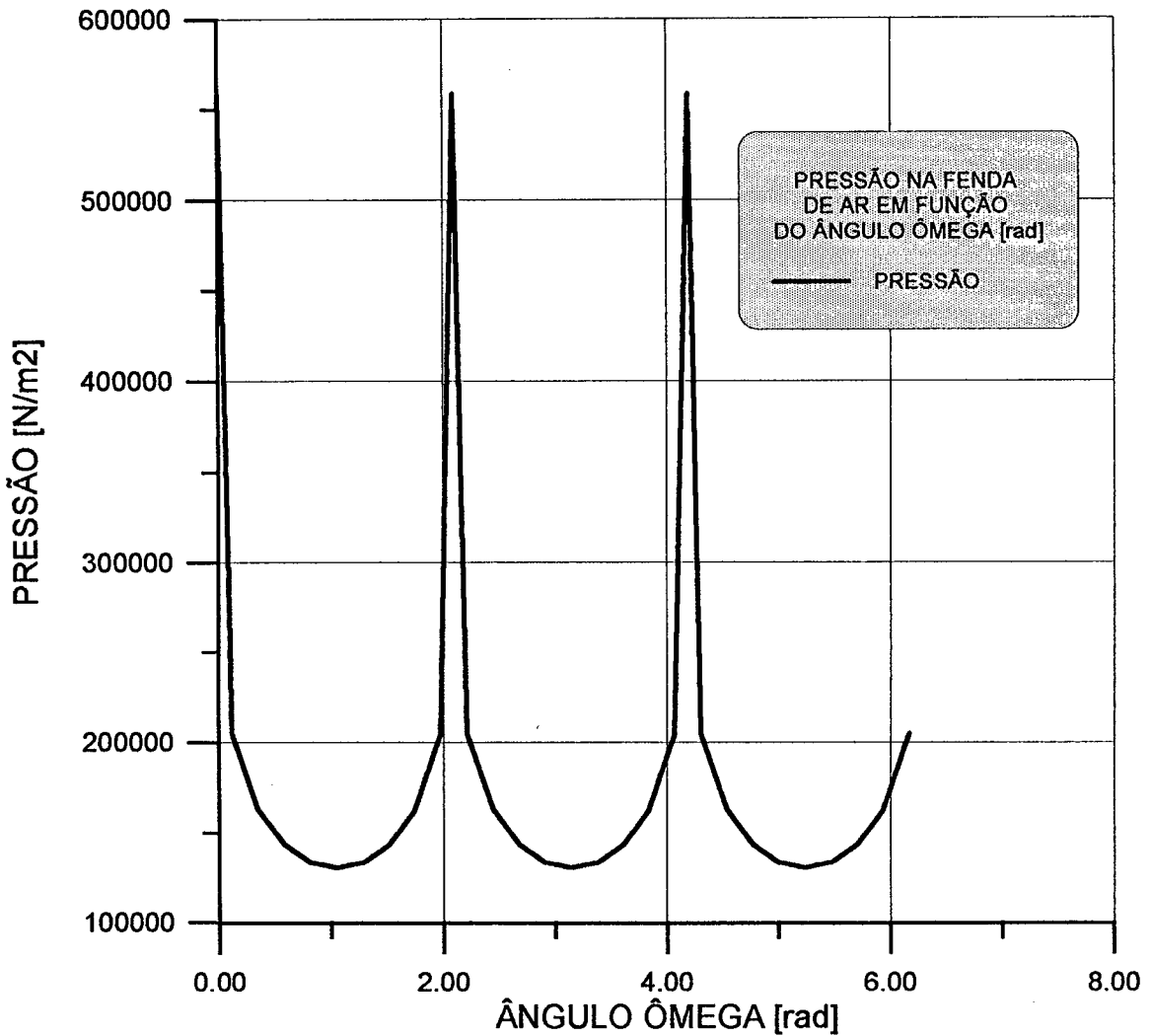


Figura 8.1 - Distribuição de pressão na fenda de ar, ao longo da circunferência que passa pelos restritores (ângulo ω).

Este programa permite visualizar o campo de pressão dentro da fenda de ar para diferentes condições de excentricidade, pressão, número de restritores, dentre outros. Isto é extremamente conveniente, pois poder-se-á comparar diretamente os dados teóricos com os experimentais deste trabalho. Portanto, é muito importante que este trabalho seja levado a cabo, para o desenvolvimento futuro desta tecnologia.

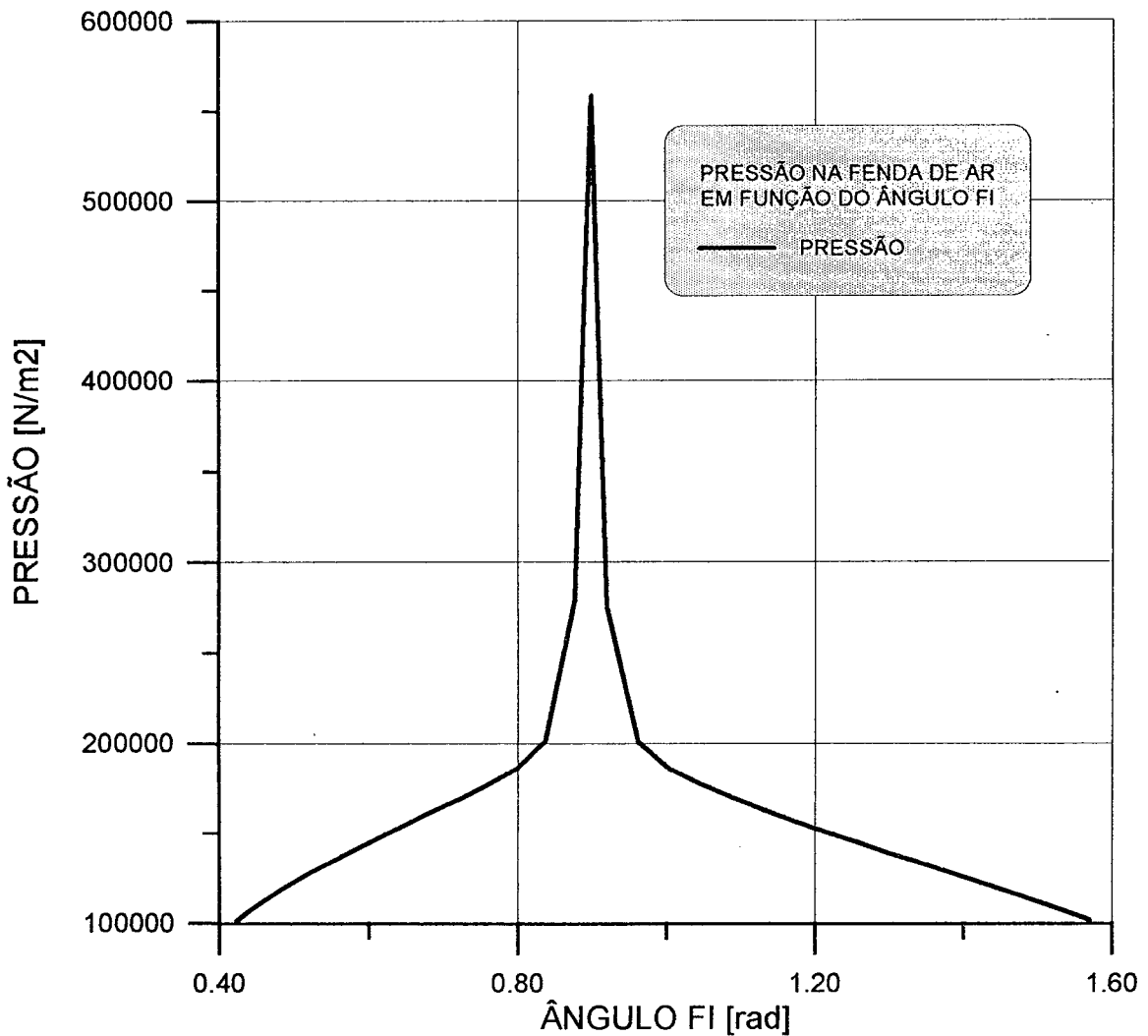


Figura 8.2 - Distribuição de pressão na fenda de ar, ao longo do arco que une o pólo ao equador da semi-esfera, e é descrito pelo ângulo ϕ .

Um programa de computador, semelhante àquele em desenvolvimento na UFSC, foi utilizado neste trabalho para levantar dados de projeto para o mancal. O programa chama-se AEROSTA, e foi desenvolvido na Alemanha. Os dados de entrada são: dimensões do mancal, número de carreiras de restritores, posição angular das carreiras, número de restritores por carreira, pressão de alimentação, diâmetro dos restritores, folga, diâmetro e profundidade dos rebaxos dos restritores. Os valores calculados são: carga axial, radial e de momento; rigidez axial,

À primeira vista, este programa parece bastante interessante, principalmente por considerar a possibilidade de se projetar mancais esféricos com mais de uma carreira de restritores. No entanto, alguns problemas surgem à medida em que se aprofunda na utilização do mesmo. Um deles é a obrigatoriedade de se projetar mancais com restritores de orifício com rebaixo. Este fato pode ser contornado pela utilização dos valores mínimos aceitos pelo programa, para o diâmetro e a profundidade do rebaixo, que são, respectivamente, 1,2 e 0,1 mm.

Um outro problema, muito mais sério que o primeiro, e que, infelizmente, não pode ser contornado, é a tendência do programa apresentar valores maiores de capacidade de carga e de rigidez para mancais com menores números de restritores, do que para mancais com mais restritores. Este problema está ilustrado nas figuras 8.3, 8.4 e 8.5, que mostram uma comparação entre capacidade de carga e rigidez, para uma, duas e três carreiras de restritores. A comparação é feita entre os valores obtidos com o AEROSTA, e os dados experimentais levantados neste trabalho.

Uma análise das figuras 8.3, 8.4 e 8.5 leva à verificação do comportamento conflitante entre o programa e a prática. Os valores obtidos experimentalmente mostram claramente a tendência de se obter maior capacidade de carga e maior rigidez à medida em que um maior número de restritores é utilizado, o que não se verifica no AEROSTA, que apresenta um comportamento inverso, neste aspecto. Desta maneira, apesar de parecer promissor no início, o programa foi descartado como fonte de auxílio no projeto do mancal em questão.

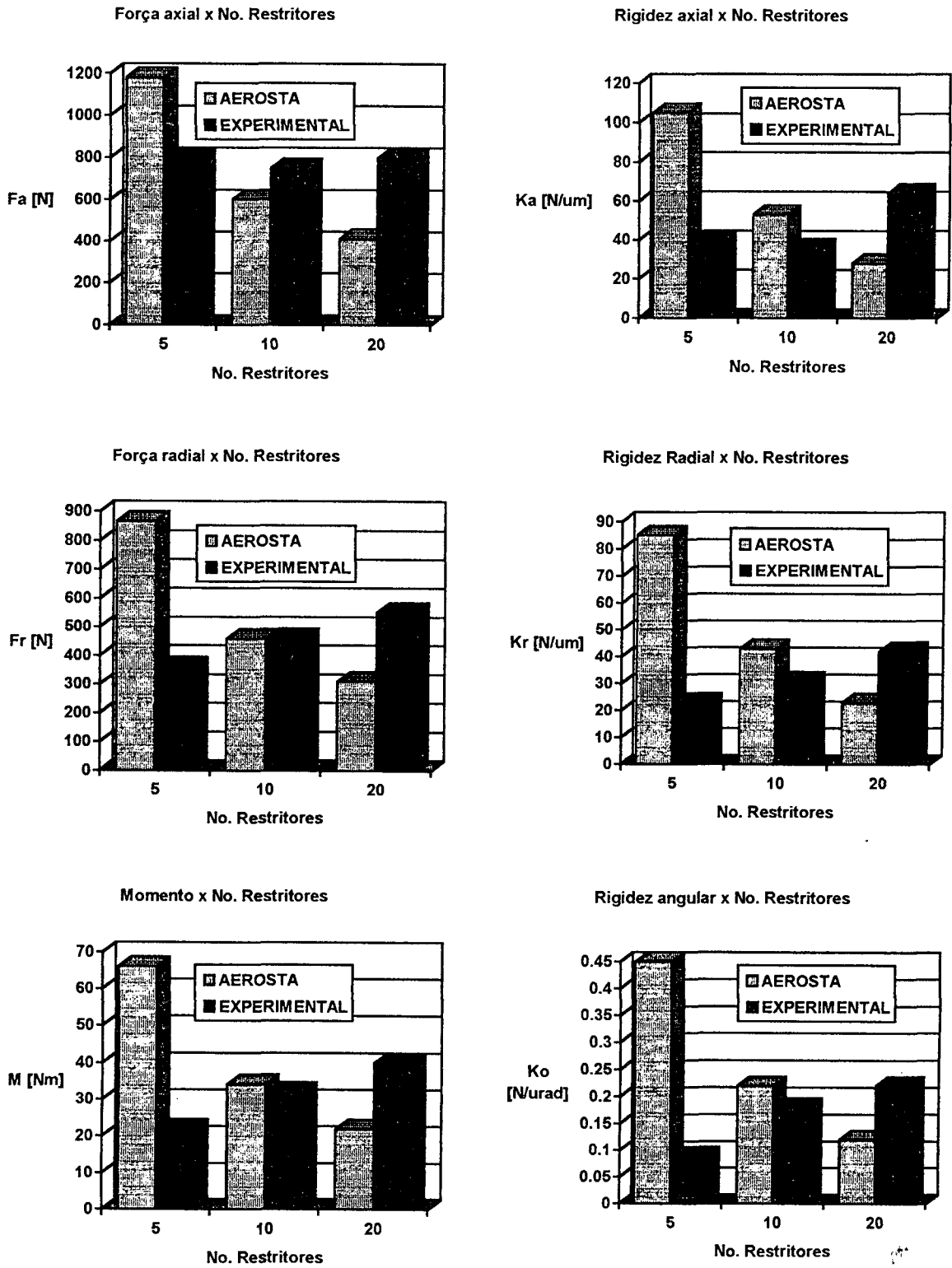


Figura 8.3 - Comparação entre os valores calculados pelo AEROSTA e os resultados experimentais obtidos neste trabalho, para o mancal com uma carreira de restritores.

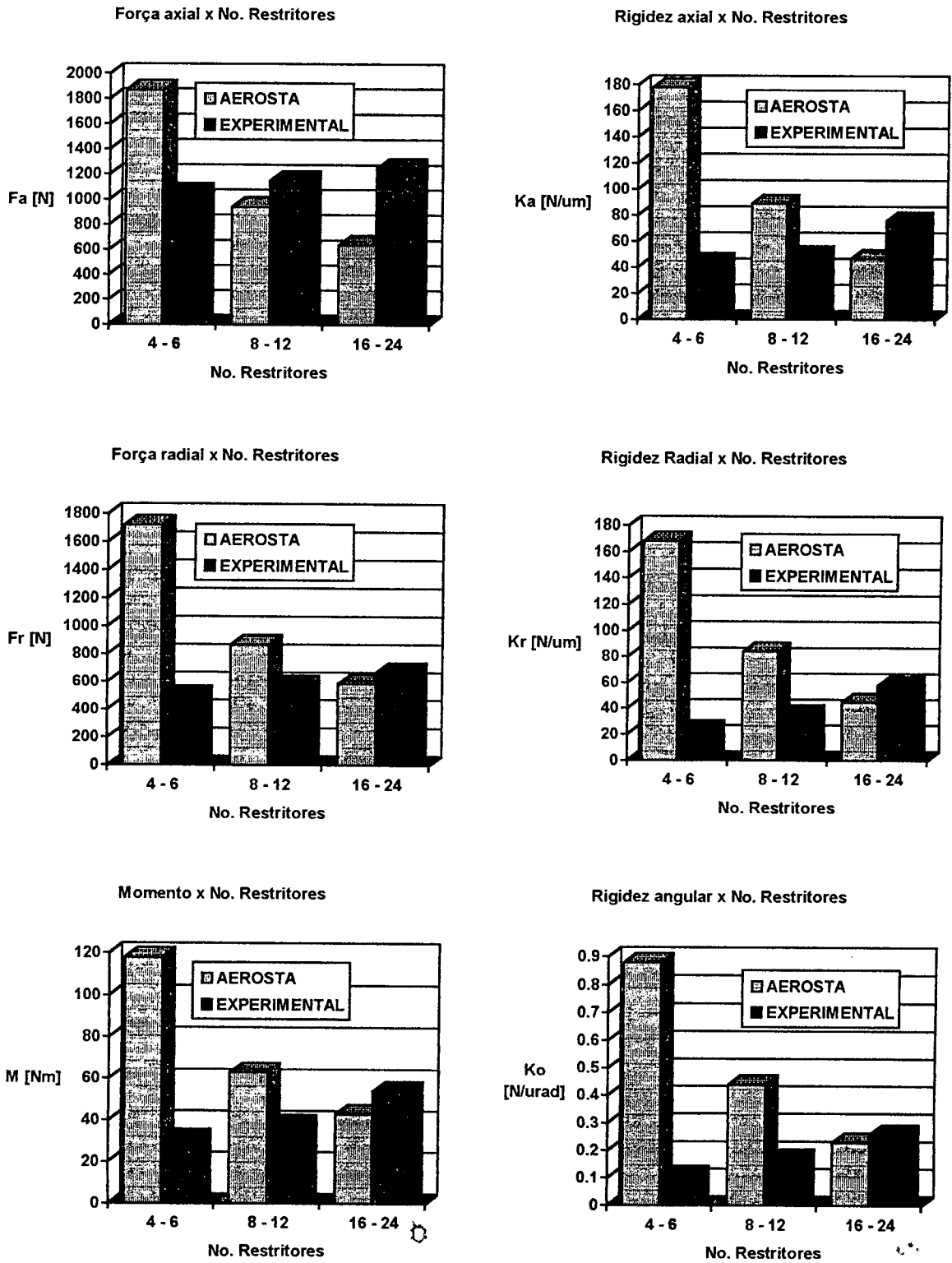


Figura 8.4 - Comparação entre os valores calculados pelo AEROSTA e os resultados experimentais obtidos neste trabalho, para o mancal com duas carreiras de

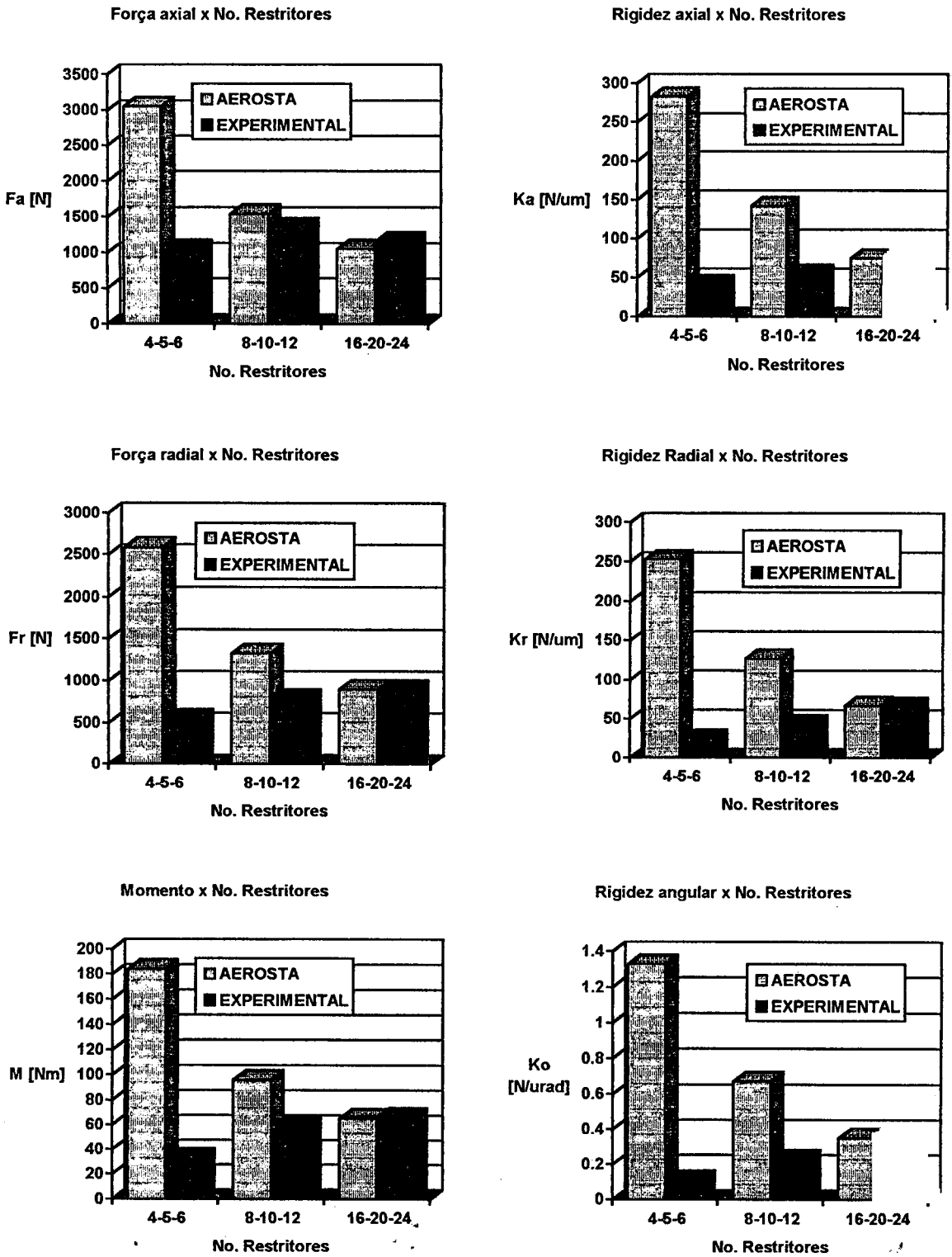


Figura 8.5 - Comparação entre os valores calculados pelo AEROSTA e os resultados expernerimentais obtidos neste trabalho. para o mancal com três carreiras de restritores.

8.1.2 Técnica de moldagem em resina

Esta técnica é bastante interessante pelo fato de permitir a construção de duas superfícies esféricas quase idênticas, ou seja, diferença de raio na ordem de micrometros, e mesmo erro de forma, sem a necessidade de utilização de máquinas de alta precisão. Por outro lado, a baixa repetibilidade do processo, que exigiu que inúmeras desmoldagens e remoldagens fossem feitas, é um fator que eleva o custo e o tempo de fabricação do mancal.

Outro aspecto negativo da técnica de moldagem em resina é o aumento dos erros de forma na superfície moldada, em comparação com os erros do molde utilizado, em função da não uniformidade do desmoldante que deve ser utilizado, e também pela contração da resina durante a cura. Estes aspectos merecem maior atenção em trabalhos futuros, pois o tempo de lapidação e a qualidade final das superfícies pode ser muito melhorada, caso este problema seja resolvido.

8.1.3 Bronze

Este material foi utilizado para a construção deste mancal por estar disponível e por apresentar boa usinabilidade. Porém, a baixa dureza e a dificuldade de retificação são problemas que dificultam a obtenção de um produto resistente ao manuseio e com alta precisão dimensional (baixos erros).

8.1.4 Restritores

A técnica de moldagem em resina é a responsável pela execução dos restritores. Por este motivo, a forma dos mesmos não é bem definida. Dá-se que, quando a costura do fio de náilon é feita, como mostrado na Figura 4.2, este contorna o fio de cobre que está na superfície esférica a ser moldada. Desta forma, quando os fios de náilon são retirados, os furos resultantes não são perpendiculares à superfície esférica (furos radiais), mas tendem a ser tangentes à mesma. Isto é prejudicial ao desempenho do mancal e uma solução para o problema ainda não foi encontrada. Este é outro ponto a ser melhorado em trabalhos futuros. Uma sugestão seria usar os restritores na resina através de furação, ou construir bujões furados na dimensão necessária e

inserir-los durante ou depois da moldagem. Isto garantiria o posicionamento dos restritores em relação à superfície esférica.

8.1.5 Rosca de ajuste da excentricidade

Esta foi uma idéia que permitiu a otimização do mancal, além da realização de testes em diferentes condições, com grande facilidade. Porém, alguns problemas surgiram. O principal deles foi a dificuldade de rosqueamento devido à presença dos elementos de vedação ("O'ring"). Portanto, mancais com aplicação definida, sem a intenção de utilização em pesquisa, devem ser construídos com sistemas fixos de montagem, nos quais o ajuste da folga é feito pela usinagem de um dos elementos construtivos.

8.1.6 "O'ring"

O projeto e a fabricação dos canais de assentamento dos "O'ring" seguiram rigorosamente os dados de projeto do fabricante deste sistema de vedação. No entanto, vazamentos foram identificados. Isto pode ter ocorrido pela movimentação relativa entre as duas superfícies a serem vedadas, por causa do rosqueamento para ajuste da excentricidade. Sugere-se maior atenção a este item.

8.2 Sobre a Fabricação

Os principais problemas relativos à fabricação do mancal se referem à moldagem em resina e já foram devidamente tratados no item 8.1.

Um ponto de destaque é o estado da arte de fabricação de semi-esferas no LMP. Devido aos trabalhos realizados anteriormente (3) e aos dispositivos de fabricação desenvolvidos, pode-se obter a superfície esférica com boa rugosidade e baixos erros de forma, a partir de uma peça torneada, através de um processo de lapidação posterior de curta duração. Este aspecto tem sido fundamental para o desenvolvimento de mancais aerostáticos esféricos no LMP.

8.3 Sobre os Experimentos

Esta parte do trabalho mereceu especial atenção por ser fundamental para a qualificação do mancal, porém alguns erros foram cometidos. O sistema de aplicação de carga foi uma inovação no LMP, e deu resultados excelentes. Os erros da força aplicada foram desprezados por serem extremamente baixos, quando comparados com os erros da medição do deslocamento. A aplicação de carga sem mecanismos de amplificação está aprovada e é recomendada para trabalhos futuros, pois, além de ter erros desprezíveis, permite um grau de liberdade (rotação) durante a aplicação da carga, o que é bastante útil na verificação do ponto de colapso do mancal.

O posicionamento dos transdutores no anel externo também deu bons resultados, já que minimizou os efeitos das deformações sofridas pelo mancal e pelos dispositivos de fixação durante a aplicação de força.

O problema principal dos experimentos foi causado por um pequeno fator administrativo. A calibração do sistema de medição de deslocamento, que revelou uma grande incerteza de medição do mesmo, foi feita apenas após a realização dos ensaios, pois acreditava-se que os erros do sistema de medição fossem bem menores. Os experimentos não puderam ser refeitos, pois a técnica utilizada para variação do número de restritores era destrutiva, ou seja, não permitia retorno às condições iniciais. Isto causou problemas de confiabilidade dos resultados, mas não invalidou os experimentos. Os resultados obtidos foram consistentemente utilizados e ajudaram na qualificação do mancal.

8.4 Sobre o Desempenho do Mancal

8.4.1 Número de restritores

As figuras 7.11, 7.12, 7.25, 7.26, 7.39 e 7.40 apresentam uma comparação entre diferentes números de restritores, para o mancal com três carreiras. Ficou comprovado que, aumentando-se o número de restritores, obtém-se maior capacidade de carga e maior rigidez. No entanto, o aumento do consumo de ar deve ser levado em consideração.

8.4.2 Número de carreiras

Os gráficos do capítulo 7 mostraram que o desempenho do mancal é melhorado com o aumento do número de carreiras de restritores. O pior caso foi sempre o de uma carreira de restritores. Porém, em muitos casos, houve pouca diferença entre o mancal com duas e três carreiras. Isto talvez encontre explicação na análise da distribuição de pressão dentro da folga. Provavelmente, há pouca alteração no perfil de pressão pelo acréscimo da terceira carreira.

Como o consumo de ar aumenta com a utilização de mais carreiras, e como o ganho em capacidade de carga e rigidez não é tão significativo, recomenda-se a utilização de duas carreiras de restritores para um projeto otimizado de mancal aerostático esférico.

8.4.3 Excentricidade relativa axial inicial (ϵ_{ao})

Analisando o comportamento do mancal, em relação aos três tipos de carregamento combinados (axial, radial, momento), pode-se concluir que a melhor condição do mancal é para excentricidade relativa axial inicial, igual a zero. Deve-se lembrar que a capacidade de carga axial para $\epsilon_{ao} < 0$ só é maior devido à menor pré-carga, e quando cargas radial e de momento são aplicadas o desempenho é prejudicado.

8.4.4 Número de entradas de ar

Não há diferença perceptível entre a utilização de uma ou duas entradas de ar por carreira. As pequenas diferenças encontradas nos gráficos do capítulo 7 são decorrentes dos erros inerentes aos experimentos.

8.4.5 Pressão de alimentação

Comprovando as expectativas, as figuras 7.15, 7.16, 7.31 e 7.32 mostram a relação direta entre pressão de alimentação e capacidade de carga e rigidez. O objetivo deste trabalho era apenas comprovar esta tendência e não qualificá-la ou quantificá-la.

apenas comprovar esta tendência e não qualificá-la ou quantificá-la.

Finalmente, conclui-se que o objetivo deste trabalho foi cumprido. Desenvolveu-se um mancal aerostático duplo-esférico desde sua concepção, passando pelo projeto, fabricação e testes, buscando sempre avaliar variações construtivas para a melhora do seu desempenho. Com as informações aqui relatadas, é possível realizar o projeto mais otimizado de um mancal aerostático de forma construtiva semelhante, sem passar por problemas vividos em trabalhos anteriores.

Este trabalho serve de orientação na escolha do número de carreiras de restritores, do número de restritores, do valor da excentricidade relativa axial inicial, da pressão de alimentação, do número de entradas de ar por carreira, além de fornecer informações valiosas sobre a fabricação dos componentes do mancal, da montagem e ajustes, e sobre o teste de mancais aerostáticos. Além disso, valores de capacidade de carga e rigidez foram registrados para o mancal em questão.

Desta forma, esta dissertação de mestrado está concluída, ficando os votos de que o conhecimento gerado não se perca e possa auxiliar na realização de outros trabalhos técnico-científicos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ LEAL, L. C. M. **Mancais radiais hidrostáticos - métodos de cálculo e verificação experimental**. Florianópolis, UFSC, 1975. 244 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1975.
- /2/ ROCHA, S. A. **Contribuições para a fabricação de mancais aerostáticos**. Florianópolis, UFSC, 1992. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.
- /3/ VALLEJOS, R. **Processos e modos de fabricação de superfícies esféricas de precisão**. Florianópolis, UFSC, 1992. 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1992.
- /4/ STOTERAU, R. L. **Comportamento estático e dinâmico de guias aerostáticas**. Florianópolis, UFSC, 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.
- /5/ SLOCUM, A. H. **Precision machine design**. Cambridge: Prentice Hall, 1991.
- /6/ WECK, M., BISPINK, T., BÖTTGER, U. et al. **High precision spindle technology**. Tutorial 6th IPES/ UME2, IPT, May/91, 100 p.
- /7/ DAVIDSON, A. **Handbook of precision engineering: Mechanical design applications**. London: McGraw-Hill, 1972, v. 6, 320p.
- /8/ BOFFEY, D. A., DUNCAN, A. E., DEARDEN, J. K. An experimental investigation of the effect of orifice restrictor size on the stiffness of an industrial air lubricated thrust bearing. **Tribology International**, p. 287-291, Oct. 1981.
- /9/ BOFFEY, D. A., BARROW, A. A., DEARDEN, J. K. Experimental investigation into the performance of an aerostatic industrial thrust bearing. **Tribology International**, v. 18, n. 3, p. 165-168, June 1985.

- /10/ STOUT, K. J. Design of aerostatic flat pad bearings using annular orifice restrictors. **Tribology International**, v. 18, n. 4, p. 209-214, Aug. 1985.
- /11/ STOUT, K. J., SWEENEY, F. Design of aerostatic flat pad bearings using pocketed orifice restrictors. **Tribology International**, v. 17, n. 4, p. 191-198, Aug. 1984.
- /12/ PURQUÉRIO, B. M., BALESTERO, L. A. Mancais fluidicos aerostáticos com ranhuras de alimentação. **Máquinas e Metais**, p. 48-58, abr. 1991.
- /13/ ARAÚJO, L. P., GAMBARINI, J. R., RUFFINO, R. T. Técnica para fabricação de mancais aerostáticos radiais com alimentação através de ranhuras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 9, 1987, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABCM, 1987. p. 685-688.
- /14/ MAJUMDAR, B. C. Externally pressurized gas journal bearings with porous inserts. **Transactions of the ASME - Journal of Lubrication Technology**, v. 102, p. 113-116, Jan. 1980.
- /15/ DUDUCH, J. G., PURQUÉRIO, B. M. Otimização de um compensador flexível para mancais aerostáticos. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 8, 1985, São José dos Campos. **Anais...** p. 753-756.
- /16/ BRUNGS, S. **Experimentelle Untersuchung und näherungsweise Berechnung von Doppelsphärischen, druckgespeisten Luftlagern unter verschiedenen Beanspruchungen.** München, TUMünchen, 1978, 134 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Technischen Universität München, 1978.
- /17/ PROFESIONAL INSTRUMENTS COMPANY. **BLOCK-HEAD[®] Operator's Manual.** Minneapolis, [19__], 19 p.
- /18/ WEINGAERTNER, W. L. Desenvolvimentos na usinagem de ultraprecisão. Monografia, Fpólis, out/92, 82 p.
- /19/ LABORATÓRIO DE METROLOGIA E AUTOMATIZAÇÃO. **Metrologia Dimensional Básica.** Florianópolis, 1988, 170 p.