

AValiação DA ESTABILIDADE DE MANCAIS AEROSTÁTICOS DE MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

André Roberto de Sousa, asousa@ifsc.edu.br

Instituto Federal de Santa Catarina. Av. Mauro Ramos, 950. 88020-300, Florianópolis, SC.

Adagir Saggin, adagirs@hotmail.com

Instituto Federal de Santa Catarina. Av. Mauro Ramos, 950. 88020-300, Florianópolis, SC.

Diego Schlatter Burato, diego_burato@hotmail.com

Instituto Federal de Santa Catarina. Av. Mauro Ramos, 950. 88020-300, Florianópolis, SC.

Resumo: Os mancais aerostáticos são classicamente empregados em máquinas de alta precisão como máquinas-ferramenta de ultra precisão e máquinas de medir por coordenadas e exercem uma função vital para a confiabilidade metrológica das medições e vida útil de guias de precisão. Neste artigo, foram realizadas avaliações em uma máquina de medir por coordenadas CNC tipo Portal, com objetivo de verificar a estabilidade de posicionamento vertical e horizontal dos mancais aerostáticos. Os ensaios consistiram em avaliar a estabilidade na posição dos mancais em função da variação de pressão aplicada, bem como avaliar o comportamento dinâmico de funcionamento da máquina no processo de medição em função do tempo, das oscilações, das cargas dinâmicas e da pressão de alimentação do sistema pneumático. Os ensaios permitiram avaliar a estabilidade no tempo, a sensibilidade dos mancais à variação de pressão na rede e avaliar variações de posicionamento frente a acelerações e desacelerações da máquina de medir por coordenadas. Todos os resultados indicaram uma estabilidade bastante eficiente dos mancais frente aos ensaios realizados.

Palavras chave: Mancais aerostáticos, Metrologia, Medição por coordenadas

1. INTRODUÇÃO

Como em qualquer área, a evolução da tecnologia depende da busca por melhorias através de investigações e de avaliações. Nos processos de medição não é diferente e nas máquinas de medir também são necessárias constantes avaliações para caracterizar o seu comportamento metrológico, e o dos seus subsistemas. Dentre estes subsistemas os mancais aerostáticos são dos mais importantes, dada sua missão de manter o posicionamento da estrutura da máquina, bem como evitar qualquer contato físico entre partes móveis. Neste sentido, a proposta deste trabalho é focada em investigar e avaliar a estabilidade dos mancais aerostáticos no posicionamento da Máquina de Medir por Coordenadas CNC (MMC) tipo portal, Modelo LK G-80, do laboratório de Metrologia do IFSC.

Nesta e em qualquer MMC, os mancais aerostáticos são empregados na sustentação da movimentação dos eixos cartesianos, sendo o tipo de mancal mais utilizado especialmente nas máquinas de medir de maior exatidão, havendo algumas poucas máquinas com mancais de contato tipo guia linear. Dentre as suas características, os principais atrativos para sua aplicação em máquinas de medir são a estabilidade de posicionamento e o atrito mínimo que prolonga a vida útil de guias a um tempo indefinido, desde que o mancal esteja operando sob condições adequadas. Nesta aplicação é imperativo que os mancais das máquinas de medir tenham a capacidade de manter sua posição estável ao longo do tempo sob uma carga estática e, sob cargas dinâmicas, variem sua posição de modo repetitivo, de modo que esta variação possa ser mapeada e inserida na matriz de correção de erros da máquina de medir. Flutuações indevidas com a máquina estática ou em movimento podem introduzir erros aleatórios e aumentar a incerteza de medição da máquina.

Este artigo tem por objetivos avaliar a estabilidade de mancais aerostáticos em máquinas de medir por coordenadas e descreve os resultados de ensaios de estabilidade de posicionamento de mancais presentes em uma máquina de medir por coordenadas CNC tipo portal do laboratório de metrologia do IFSC. Nesta avaliação é empregado um sistema opto eletrônico de medição de deslocamentos com resolução e exatidão sub micrométrica acoplado à estrutura da máquina de medir. Os ensaios permitem avaliar a oscilação vertical do portal da máquina no longo prazo, verificar a sensibilidade da posição do mancal à flutuação de pressão de alimentação na rede de ar comprimido, bem como verificar a capacidade de amortecimento dos mancais a cargas dinâmicas geradas pela movimentação da máquina.

2. MANCAIS AEROSTÁTICOS: FUNDAMENTOS, APLICAÇÕES E INSTRUMENTAÇÃO PARA ENSAIOS

2.1. Princípios e Características dos Mancais Aerostáticos

Como citado, os mancais aerostáticos são classicamente empregados em máquinas de alta precisão motivado por características como baixa sensibilidade às variações de temperatura, alto nível de amortecimento, baixíssimo atrito, nenhuma geração de calor, capacidade de suportar cargas em direções diversas e desgaste muito baixo ao longo do tempo [Panzera, 2007; Balestrero, 2013]. Complementando estas características com o uso do ar, é dispensado sistema de coleta e sistemas de refrigeração, porém, não são próprios para carregamentos elevados, comparando-se aos hidrostáticos. Entre os gases testados o ar tem sido dos mais utilizados e atendido as exigências [Stoeterau, 1996].

Nestes mancais, segundo Tanaka, 2006, o ar comprimido é injetado através de pequenos furos, chamados de restritores, que são distribuídos na superfície de deslizamento da sapata, criando um filme de ar com 5 a 10 μm de espessura, que suspende a sapata, possibilitando a movimentação sem haver contato direto com a guia, garantindo boa exatidão nas medições. Historicamente, a primeira vez que se ouviu falar do ar como possível lubrificante foi através de Hirn, em 1854, mas o primeiro mancal a ar foi feito por Albert Kingsburry, em 1889, que o apresentou na Conferência do Departamento Naval Americano em 1895. Tratava-se de um mancal radial e se testou a utilização do ar e do hidrogênio como lubrificante, e seus resultados serviram como uma das primeiras confirmações da teoria de Reynolds [Pereira, 1998; Stoeterau, 1996].

Nas máquinas de medir por coordenadas, os mancais aerostáticos são largamente empregados na sustentação e na movimentação dos eixos cartesianos, sendo o tipo de mancal mais utilizado especialmente nas máquinas de medir de que requisitam maiores exatidões. A manutenção da posição dos eixos da máquina pelos mancais ao longo do tempo é um requisito para garantir que a mesma apresente comportamento repetitivo e que, assim, seja possível a correção de erros sistemáticos. Para assegurar esta estabilidade os mancais devem ter alta qualidade geométrica, devendo possuir baixos erros dimensionais e de forma. Algumas aplicações de usinagem só são viabilizadas com a utilização de mancais aerostáticos, como é o caso das máquinas ferramentas para usinagem com diamante, utilizadas na produção de espelhos de primeira superfície com precisão manométrica [Silva e Balestrero, 1996].

A literatura sobre mancais aerostáticos afirma que, para atingir os limites de qualidade na sua fabricação, em geral são empregadas máquinas especiais ou operações meticulosas e sucessivas de acabamento nos componentes dos mancais. Um dos componentes mais importantes são os restritores, que são os orifícios de passagem do ar, com os diâmetros variando de 0,1 a 0,5 mm. Stouterau, 1996 com objetivo de desenvolver mancais aerostáticos de baixo custo, verificou que uma boa relação custo/benefício (capacidade de carga, rigidez) é possível com restritores de fluxo com diâmetro de 1 mm, eliminando a necessidade de equipamentos especiais para a fabricação e demonstraram bons resultados em máquinas-ferramentas de ultra precisão.

A figura 01 ilustra um mancal aerostático plano em formado por duas placas circulares de raio interno R_1 e raio externo R_4 . Uma das placas tem uma ranhura de alimentação circular do ar comprimido de raio R_2 . A alimentação do ar comprimido é fornecida para o mancal a uma pressão constante P_s , em seguida passa através das ranhuras até a folga do mancal, a uma pressão P_0 e escoar radialmente até as bordas interna e externa do mancal para a atmosfera a uma pressão constante P_a . Para esta configuração, os fluxos radiais interno e externo são iguais. Quando a carga axial é aplicada perpendicularmente à placa do mancal, diminui a folga entre as duas placas e aumenta, consequentemente, a resistência à vazão de ar, de modo que menor quantidade de ar escoará para a atmosfera, reduzindo a queda de pressão na ranhura e fazendo com que a pressão na folga aumente e suporte a carga aplicada, inclusive com maior rigidez [Silva e Balestrero, 1996]. Nas MMCs, os mancais são de escora, concebidos a partir de um mancal plano de sapata circular com alimentação central, tendo rigidez e capacidade de carga somente na direção perpendicular à sua superfície e com carregamento compressivo, como pode ser visto na figura 02.

Segundo Pereira e Weingaertner, 1999, com a evolução e a necessidade da qualidade dos produtos industriais, as tolerâncias dimensionais e geométricas são mais exigentes. Então, tanto na fabricação como nas inspeções, os quais são influenciados por vibrações, exige-se de mancais aerostáticos com maior rigidez e estabilidade nas trajetórias dos movimentos das máquinas. Na figura 03 Pereira e Weingaertner, referenciaram-se a Prata (1996) e apresentam um estudo realizado por Rehstelner e Cannon (1972) onde é possível modelar matematicamente o comportamento de sapatas circulares com superfície e alimentação central, que apresentam desvios forma côncava e convexa. Um dos resultados observados nas curvas numeradas de 1 a 4, que apresentam 4 níveis de carregamento imposto a sapata durante o ensaio.

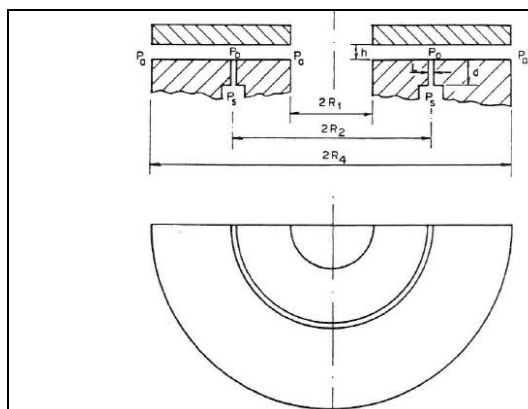


Figura 01 - Mancal aerostático plano axial com ranhura radial (Balestrero, 1996)

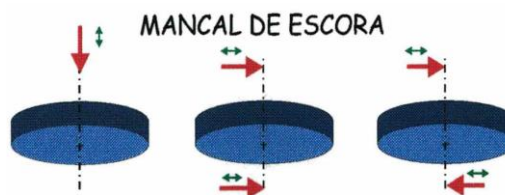


Figura 02 –Mancal aerostático axial com orifício central (Pereira, 1998)

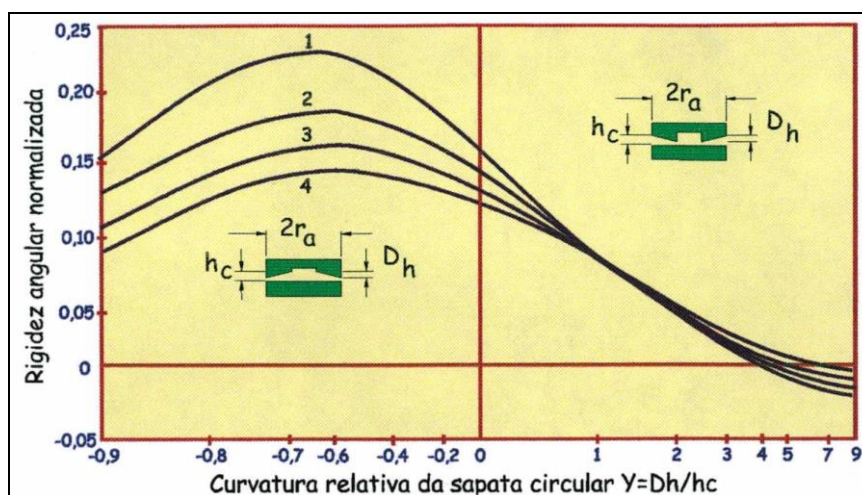


Figura 03 – Efeito da conicidade sobre a rigidez de sapatas planas circulares.

Nota-se pela figura que há um ponto de máxima rigidez é quando a sapata assume a forma côncava com curvatura de aproximadamente $Dh/hc = 0,7$. Isto quer dizer que, para um mancal que possui uma folga de trabalho de 10 μm , deverá haver uma diferença entre alturas desta folga da extremidade para o centro da sapata de 7 μm . [Pereira & Weingaertner, 1999].

2.2. Aplicação dos Mancais aerostáticos na Máquina de Medir por Coordenadas avaliada

A Máquina de Medir por Coordenadas LK G80-C (figura 04) com controlador CNC foi a máquina selecionada para base dos ensaios propostos neste artigo. Conforme figura 04, a máquina de medir na sua parte mecânica é constituída pela mesa de granito, que é o plano de apoio para colocação das peças a serem medidas, da estrutura e dos demais mecanismos que acionam os movimentos dos eixos ortogonais “X”, “Y” e “Z”, sustentados por mancais aerostáticos.

No planejamento dos ensaios foi necessário conhecer em detalhes o sistema pneumático completo da máquina, descrito a seguir.

a) Unidade de tratamento de ar comprimido - O controle de pressão é realizado através da manipulação da válvula redutora de pressão e monitoramento pelo manômetro da unidade. O suprimento de ar comprimido para os mancais aerostáticos da MMC, necessita de uma atenção especial devido sua influência sobre os mancais. O processo de admissão, geração e distribuição do ar comprimido gera contaminações por meio de particulados sólidos, água e óleo. Para evitar qualquer problema aos mancais aerostáticos é recomendado a instalação de elementos foltrantes, para atender os requisitos de qualidade do ar, conforme classificação da Norma ISO-8573-1.

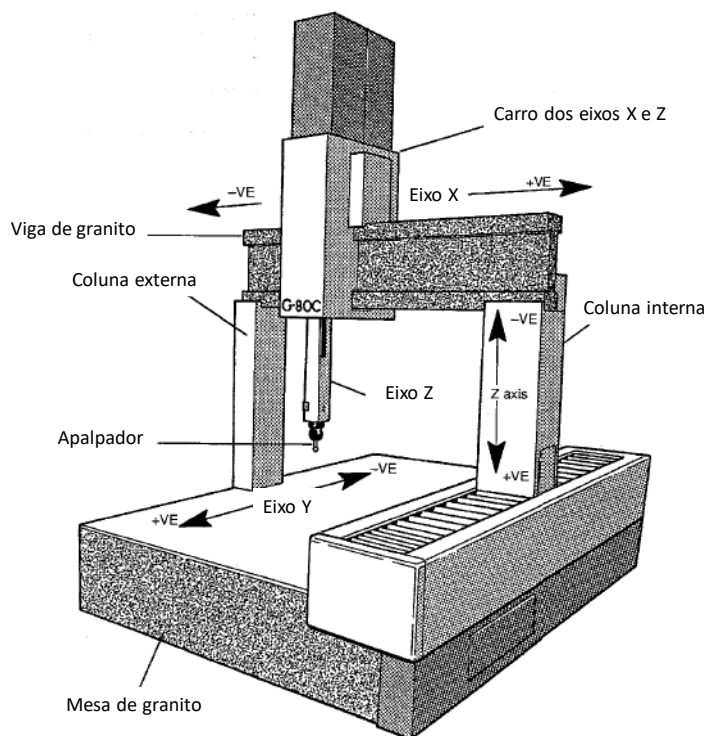


Figura 04 – Visão geral da MMC - LK Limited

b) O sistema pneumático que alimenta os mancais aerostáticos da MMC pode ser descrito com o auxílio da figura 05 o qual consiste dos elementos:

- Uma unidade de tratamento do ar comprimido “1”, é responsável pelo controle da pressão de entrada e filtragem do ar com o rigor necessário;
- Dois blocos *manifold* “2” que integram as partes dos circuitos que alimentam os mancais de ar;

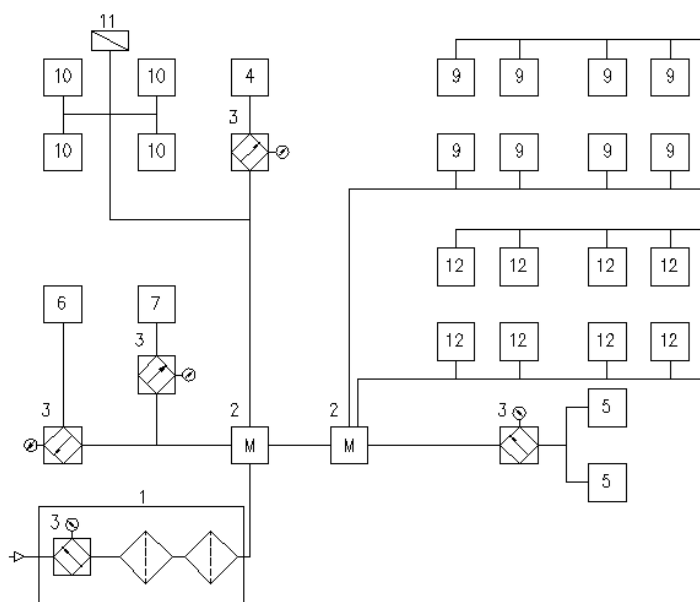


Figura 06 – Diagrama pneumático da MMC LK

- Os mancais aerostáticos “4, 5, 6 e 7”, exigem um controle específico na pressão de alimentação deles, controlados por válvula redutora de pressão “3” com manômetro incorporado. Onde, o mancal aerostático “4”, é único e seve de sustentação da coluna externa para o movimento no eixo “X”, dois mancais de ar “5” para

Ensaio 3) Neste ensaio se avalia a estabilidade dos mancais laterais que suportam a MMC na direção X (Local 2 na figura 09). A medição do deslocamento do mancal é feita continuamente ao longo do deslocamento da MMC no eixo X, em tempo real. A MMC foi programada para deslocar-se em X em modo rápido de um extremo ao outro da faixa de medição e depois retornar ao ponto de partida.

Ensaio 4) Este ensaio teve como objetivo verificar a estabilidade dos mancais aerostáticos na direção “X” da máquina, com o apalpador MT25 posicionado no Local 2 na figura 09. A MMC foi posicionada no início do eixo X e programada para deslocar-se em velocidade rápida até 5 mm da superfície de uma peça. Atingindo esta posição a MMC passou a deslocar-se em velocidade de apalpação até apalpar a peça e, após isso, recuar em velocidade rápida até o ponto de partida. Os deslocamentos laterais da MMC foram monitorados ao longo de todo este percurso de ida e volta.

Ensaio 5) Ensaio realizado com o objetivo de avaliar a estabilidade de longo prazo dos mancais. O apalpador foi posicionado no Local 1 na figura 09 e zerado. Após isso deixou-se a MMC estática durante 3 horas, sendo medida a posição do apalpador a cada 2 segundos. Com isso verificou-se a capacidade dos mancais em estabilizar o portal da MMC ao longo de um prazo longo o suficiente para cobrir o período da maior parte das medições de peças.

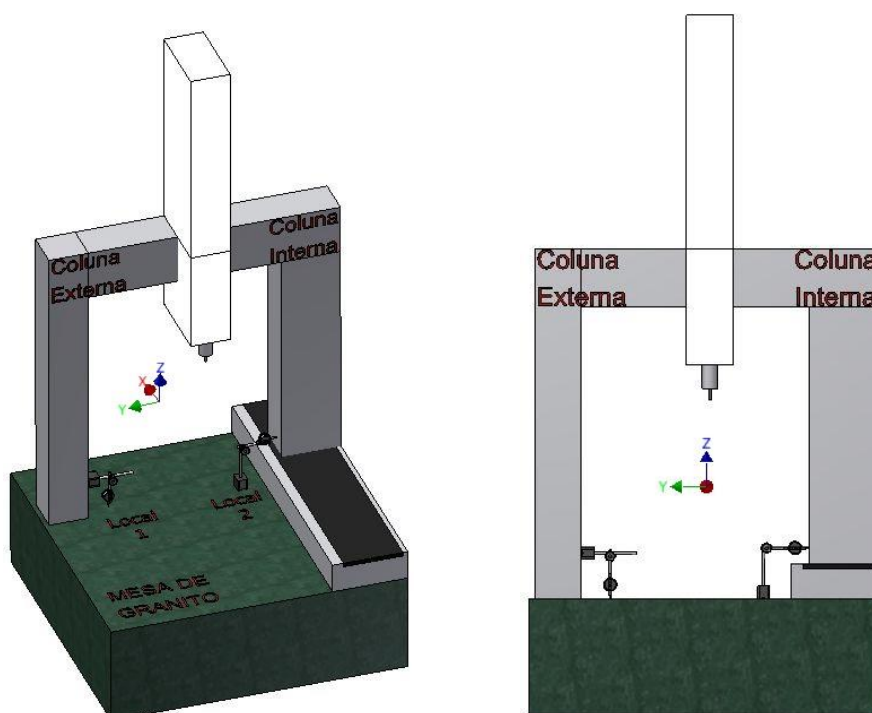
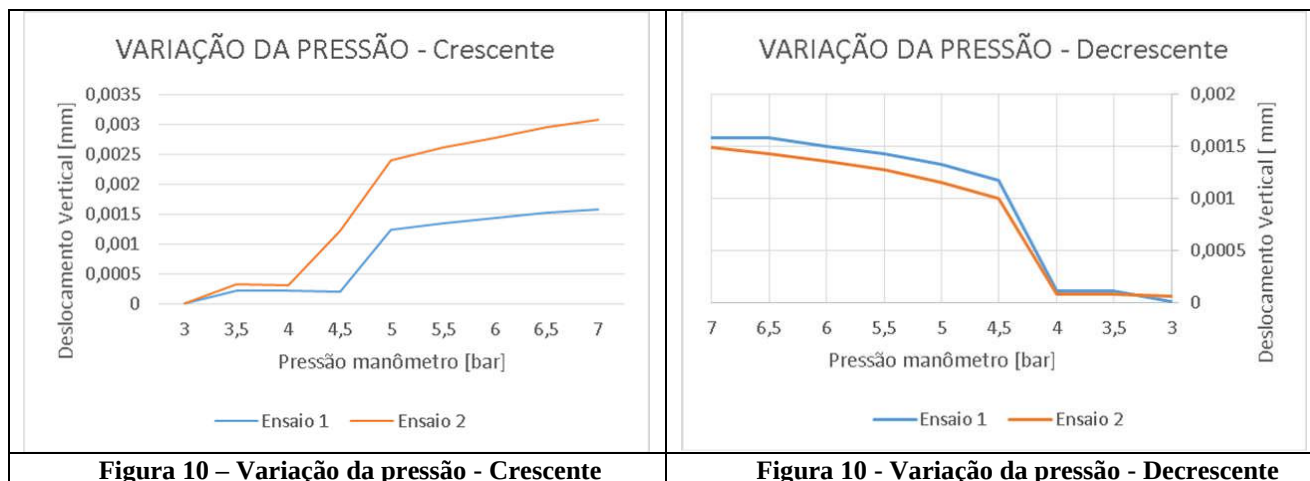


Figura 9 – Representação da MMCs em perspectiva e frontal, detalhando o local de medição.

3.2 Execução e Resultados dos Ensaios

- **Ensaio 1: Variação de pressão de alimentação**

A variação da pressão foi regulada manualmente entre 3 e 7 bar com um incremento de 0,5 bar para cada resultado do deslocamento mostrado através do indicador ND-287. Inicialmente uma variação crescente foi aplicada observando um deslocamento acentuado entre as pressões de 4 a 5 bar, conforme figura 10. Na Figura 11, demonstra-se a variação decrescente este deslocamento acentuado foi observado entre as pressões de 4,5 a 4 bar. Este deslocamento acentuado caracteriza a flutuação da coluna através do mancal aerostático observado na coluna externa. Conclui-se neste ensaio que a flutuação é garantida a partir de 4,5 bar de pressão pela análise da curva do ensaio “1”. A MMC não opera se a pressão oscilar abaixo de 10% da pressão nominal de alimentação de 6 bar.



- Ensaio 2: Variação da posição do carro X em passos de 120 mm**

Este ensaio foi realizado com a pressão de trabalho em 6 bar, comparador MT 25 posicionado na coluna movida com apalpador na mesa de granito da MMC. Movendo-se a MMC na direção em passos de 120 mm foi avaliado o deslocamento na direção Z, causada pelo peso do carro X.

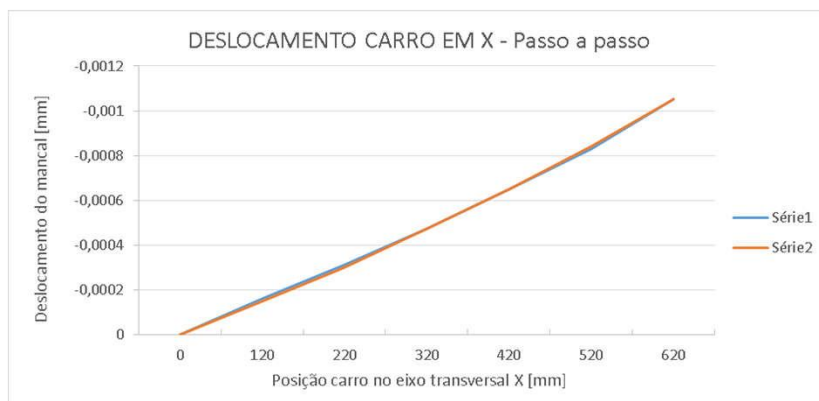
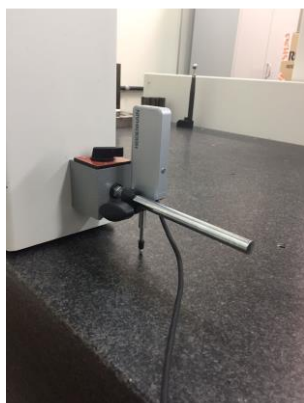


Figura 12 – Deslocamento do carro no eixo “X” – Passo a passo

Duas séries de medição foram realizadas. A primeira (série 1) consistiu em realizar a medição em ordem crescente do ponto 0 a 620 mm no eixo X e após a série 2 para retornar em ordem decrescente até a marca zero. A cada ponto de medição é coletado a variação vertical do mancal, tendo está uma variação máxima de 0,00105 mm no ponto mais distante em relação ao mancal analisado 620 mm. Este resultado mostra-se dentro da exatidão de medição volumétrica especificada para este modelo de MMC.

- Ensaio 3: Avaliação da estabilidade lateral do mancal**

Conforme descrito no planejamento, neste ensaio avaliou-se o deslocamento horizontal dos mancais. O apalpador foi posicionado na direção X da MMC e esta foi programada para mover-se a partir do início do eixo X até o seu final, e retornar. Os resultados encontrados podem ser vistos na figura 13, onde se observa um deslocamento máximo de 0,0009 mm no momento em que a MMC para completamente e inverte o sentido de movimento. Ao deslocar-se em sentido de retorno até o ponto de partida o mancal reposiciona a MMC em seu ponto de origem. Os deslocamentos medidos encontram-se dentro dos limites de erro especificados para a MMC avaliada.

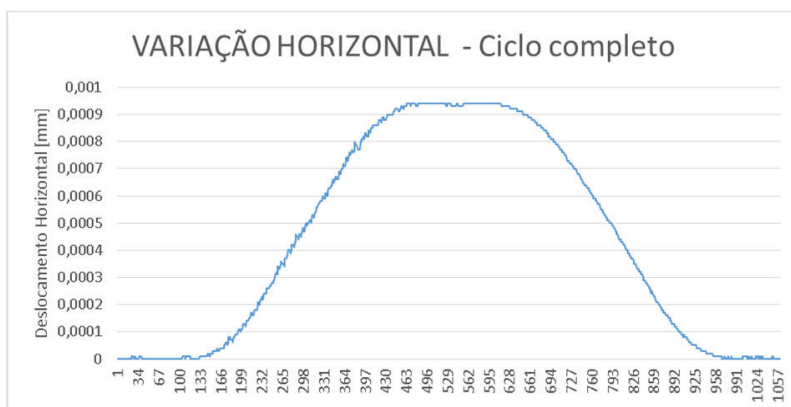


Figura 13 – Variação Horizontal – Ciclo completo

- Ensaio 4: Avaliação da estabilidade lateral apalpando peça**

Como planejado, a MMC foi programada para deslocar-se em velocidade rápida e apalpar a superfície da peça. Os resultados deste ensaio estão representados na figura 14, podendo-se observar o mesmo perfil de deslocamento causado pela aceleração e desaceleração da máquina visto no ensaio anterior, mas com o detalhe de uma instabilidade localizada próximo ao ponto 490 no gráfico. Este movimento ocorre no momento em que o apalpador toca na peça e a MMC inverte o sentido de movimento (deslocamento de 0,00058 mm). Os deslocamentos medidos são bastante pequenos, comparados aos limites de erro da MMC, comprovando a eficiência dos mancais neste ensaio.



Figura 14 – Variação horizontal – Meio ciclo

- Ensaio 5: Avaliação da estabilidade de longo prazo**

Com a MMC estática e mantida com a pressão estável na alimentação de 6 bar, o apalpador MT 25, foi posicionado na coluna movida de acordo com figura 9 no “Local 1” com sua ponta de contato na mesa de granito. Nesta condição o movimento vertical da MMC foi medido durante aproximadamente 2 horas e 33 minutos, adquirindo-se um ponto a cada 2 s. Observou-se (figura 15) que a oscilação neste período que a oscilação máxima foi de 0,00003 mm valor muito baixo diante do erro especificado para a MMC avaliada, já abaixo da incerteza do comparador eletrônico empregado nos ensaios. Confirmou-se a expectativa de excelente estabilidade estática do mancal aerostático.

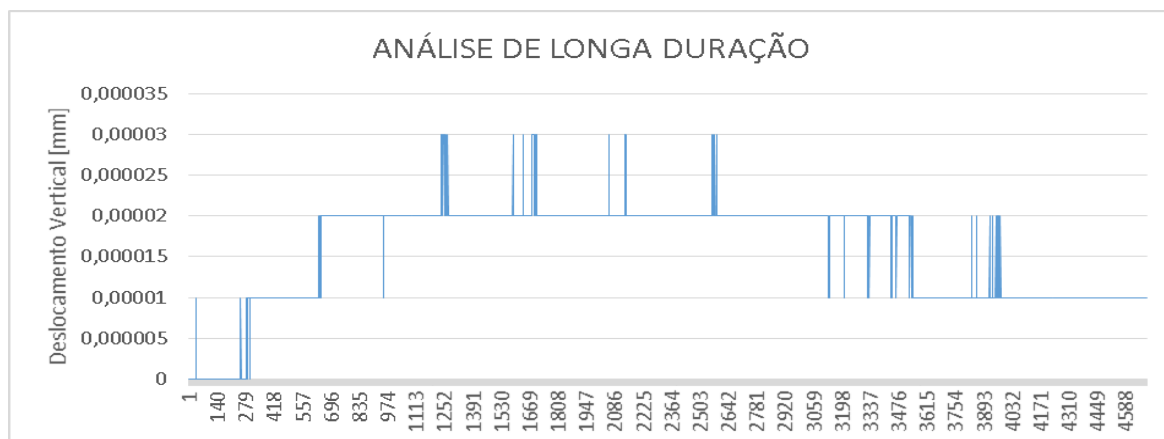


Figura 15 – Comportamento da oscilação na análise de longa duração

4. CONCLUSÕES

A eficiência com que os mancais aerostáticos operam em uma MMC são responsáveis não só pela exatidão nas medições, mas também pela vida útil de mesa e guias de precisão e, assim sendo, devem ser passíveis de verificação. Os ensaios realizados neste artigo permitiram avaliar a estabilidade de posicionamento vertical e horizontal dos mancais aerostáticos na estrutura da MMCs, tanto nos ensaios estáticos como nos dinâmicos. Os valores medidos permitem concluir de modo geral pela excelente estabilidade dos mancais frente aos requisitos de precisão da máquina de medir por coordenadas avaliada.

Os ensaios permitiram evidenciar, no entanto, a grande sensibilidade que a pressão de alimentação possui sobre a flutuabilidade e a estabilidade dos mancais. Nos ensaios realizados foi possível verificar que uma variação de até 0,003 mm, sendo que a oscilação é baixa próximo da pressão nominal da MMC (6 bar). Nos testes se variou a pressão de alimentação bem mais do que normalmente ocorre na prática, podendo-se observar a quebra do filme de ar abaixo de 4,5 bar quando o mancal não faz mais a escora com o filme de ar.

Através do ensaio movimentado o carro no eixo “Y” observou-se que existe uma variação máxima de 0,0011 mm à medida que o carro se afasta da coluna interna ou movida, sendo uma variação praticamente linear no curso de 620 mm. Esta variação não irá provocar erros de medição nesta dimensão caso os erros da MMC sejam mapeados e corrigidos por software. Nos ensaios horizontais (medição na direção Y), mediu-se variações abaixo de 0,001 mm tanto em movimento contínuo somente como em movimento e apalpação. Mais uma vez, esta oscilação não deve ser causadora de erros de medição na MMC nesta proporção, caso estes erros estejam considerados na correção da máquina e calibração da ponta.

No ensaio de estabilidade de longa duração, testou-se a MMC por um período superior ao verificado na maioria das medições no dia a dia de uma MMC e, conclui-se que a oscilação é muito pequena diante dos requisitos de exatidão da MMC avaliada. Os valores de oscilações e estabilidade verificados nas diversas situações dos ensaios são previsíveis, isto significa que são na maioria erros sistemáticos. Mas, a princípio os valores obtidos não são críticos, devido estarem bem abaixo da incerteza que se supõem na necessidade de aplicação da máquina, o intuito destes resultados poderá contribuir para verificar o quanto eles possam estar contribuindo na incerteza da máquina.

Os métodos empregados na avaliação dos mancais da MMC do IFSC foram bastante práticos de aplicação dada a instrumentação disponível, mas podem ser reproduzidos de modo rápido mesmo com instrumentação manual (relógio comparador com resolução de 0,001 mm), para um ensaio para investigar possíveis problemas no sistema de mancais de uma MMC.

5. REFERÊNCIAS

- BALESTRERO, L.A. P. - *Avaliação e seleção de mancais aerostáticos para eixos-arvores de máquinas-ferramentas* - Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 133-143, out. 2013
- SILVA, G. T., BALESTRERO L.A.P. - *Mancais aerostáticos e mancais convencionais um estudo comparativo com fins didáticos*. Anais do XXXIV COBENGE – 2006.
- HEIDENHAIN – Dr Johannes Heidehain GmbH- *Length Gauges* – www.heidenhein.de - Acessado em 20 Out 2016.
- HEIDENHAIN - Dr Johannes Heidehain GmbH - *Working with the ND 287 position display unit* –

www.heidenhein.de Acessado em 20 Out 2016.

LK Limited - *Mechanical maintenance manual for the LK G-80C MMC* – Manual de referencia N° MMC-G-80C_M2_01 – Issue 01 May 1990.

ISO-8573-1- International Standard - *Compressed air for general use Part 1: contaminants and quality classes* - First edition 1991-12-15.

PANZERA, T.H. – *Desenvolvimento de um material compósito cerâmico para aplicação em mancais porosos*. Tese Doutorado em Engenharia Mecânica – UFMG – 2007.

PEREIRA M. – *Desenvolvimento de uma mesa de retificação para a usinagem de sapatas planas circulares para mancais aerostáticos*. Dissertação de mestrado – Florianópolis, 1998.

ROCHA, A. S., *Contribuição na fabricação de mancais aerostáticos*- Tese de mestrado UFSC – Florianópolis SC – 1993

SOUZA, J. F., ALMEIDA, S.M., NUNES, J.M., SUTÉRIO, R. – Requisitos de qualidade na fabricação de um mancal aerostático para simulador de controle de atitude. Artigo I CIMMEC – Rio de Janeiro – 2008.

STOETERAU, R. L. *Comportamento estático e dinâmico de luvas aerostáticas para guias lineares*. Dissertação - Florianópolis, 1996.

TANAKA, M. C. – *Avaliação de um Dispositivo Utilizado em Máquina de Medir por Coordenadas*. Monografia, UFRN, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Recursos Humanos – PRH 14/ANP. Áreas de Concentração: Engenharia de Petróleo, Natal/RN, Brasil.

WEINGAERTNER, W. L., PEREIRA M. – *Desenvolvimento de uma mesa de retificação para a usinagem de sapatas planas circulares para mancais aerostáticos*. Artigo XV COBEM - Águas de Lindóia SP 1999.

PERFORMANCE EVALUATION OF AIR BEARINGS USED IN COORDINATE MEASURING MACHINES

André Roberto de Sousa, asousa@ifsc.edu.br

Instituto Federal de Santa Catarina. Av. Mauro Ramos, 950. 88020-300, Florianópolis, SC.

Adagir Saggin, adagirs@hotmail.com

Instituto Federal de Santa Catarina. Av. Mauro Ramos, 950. 88020-300, Florianópolis, SC.

Diego Schlatter Burato, diego_burato@hotmail.com

Instituto Federal de Santa Catarina. Av. Mauro Ramos, 950. 88020-300, Florianópolis, SC.

¹Instituto Federal de Santa Catarina. Av. Mauro Ramos, 950. 88020-300, Florianópolis, SC.

Abstract: Air bearings are classically used in high-precision machines such as ultra-precision machine tools and coordinate measuring machines and play a vital role in the metrological reliability of measurements and the life of precision guides. In this article, evaluations were carried out in a bridge type CNC coordinate measuring machine, with the purpose of verifying the vertical and horizontal positioning stability of the bearings. The tests consisted in evaluating the stability of the bearing position as a function of the applied pressure variation, as well as evaluating the dynamic behavior of the machine in the measurement process as a function of time, oscillations, dynamic loads and Pneumatic system. The tests allowed to evaluate the time stability, the sensitivity of the bearings to the variation of pressure in the network and variations of positioning against accelerations and decelerations of the machine. The tests have shown that all results indicated a fairly efficient stability of the air bearings to the tests performed.

Key words: air bearings, metrology, coordinate measuring machines

The authors are the only responsible for the content of the printed material presented in this work.