

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE GEOMÉTRICA DE MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS DE GRANDE PORTE PELA MEDIÇÃO DE ALVOS PERMANENTES

André R. Sousa¹, Cristiana Zanatta Viana², Clídio Richardson G. de Lima³, Sérgio Okazaki⁴

¹ CEFET/SC – Laboratório de Metrologia – Medição por Coordenadas, Florianópolis, Brasil, asouza@cefetsc.edu.br

² General Motors do Brasil, ME Dimensional Engineering, São Caetano do Sul, Brasil, cristiana.viana@gm.com

³ General Motors do Brasil, ME Dimensional Engineering, São Caetano do Sul, Brasil, clidio.lima@gm.com

⁴ General Motors do Brasil, ME Dimensional Engineering, São Caetano do Sul, Brasil, sergio.okazaki@gm.com

Resumo: Este artigo aborda a importância da avaliação periódica da estabilidade geométrica de Máquinas de Medir por Coordenadas (MMC) de grande porte e propõe um método experimental que utiliza a medição da posição de alvos fixos na própria estrutura da máquina de medir para monitorar alterações na sua geometria.

Palavras chave: Metrologia, Medição por Coordenadas, Confiabilidade Metrológica.

1. AS MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS DE GRANDE PORTE

A tecnologia de medição por coordenadas é atualmente o recurso metrológico mais poderoso que as indústrias possuem para desenvolver dimensionalmente bons produtos e garantir a qualidade dimensional da produção [1]. Em uma montadora de veículos isto não é exceção, com a particularidade de que o controle de estruturas automotivas se dá com máquinas de medir por coordenadas de grande porte.

O controle geométrico de peças estampadas e componentes de grande porte, conjuntos soldados ou mesmo do veículo inteiro é atualmente quase todo realizado por estas máquinas (figura 1). A qualidade dos produtos é, assim, grandemente auxiliada pelos recursos da máquina de medir por coordenadas e dependente da sua exatidão.

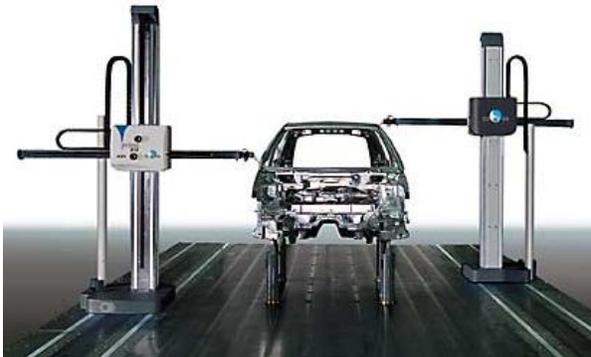


Fig. 1. Máquina de medir por coordenadas de grande porte na indústria automobilística

O modelo de máquina mais comumente empregado para esta tarefa possui a configuração cinemática mostrada na figura 2. São máquinas de medir por coordenadas do tipo braço (*horizontal arm*), com uma coluna vertical e um braço horizontal que suporta o apalpador. As dimensões destas máquinas variam conforme a aplicação existindo máquinas com até 30 metros de comprimento no maior eixo. No entanto, os tamanhos mais frequentemente encontrados possuem faixas de medição próximas a 6000 mm (eixo X), 2000 mm (Eixo Y) e 3500 mm (Eixo Z). Frequentemente as máquinas possuem duas colunas que trabalham de forma independente.

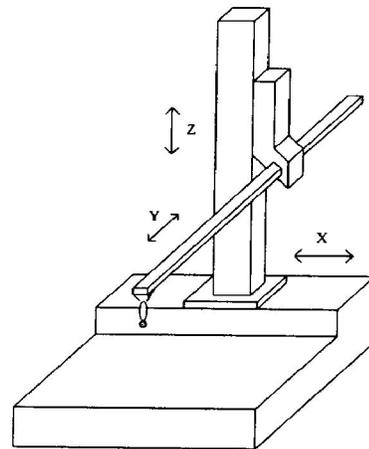


Fig. 2. Configuração cinemática de máquina de medir por coordenadas tipo braço horizontal

A exatidão destas máquinas é designada pelo parâmetro de Erro Máximo Permissível (MPE) [2-3] que descreve os valores máximos de erro que a máquina deve apresentar no seu volume de trabalho. Valores típicos para essas máquinas estão próximos a:

$$MPE < 25 + \frac{L}{50} \mu m \quad (1)$$

2. INSTABILIDADE GEOMÉTRICA NAS MÁQUINAS DE MEDIR DE GRANDE PORTE

Uma máquina de medir por coordenadas é a materialização de um sistema de coordenadas cartesiano e, como tal, deveria possuir uma geometria composta por 3 eixos perfeitamente retilíneos e ortogonais entre si [4].

No entanto, quando materializada nas máquinas de medir, essa definição matemática sofre as limitações da impossibilidade de perfeição na retitude de guias, e perpendicularidade entre eixos X, Y e Z [1]. Assim, o sistema de coordenadas da máquina apresenta desvios geométricos que podem ser determinados e corrigidos mecanicamente ou matematicamente.

Esta máquina, uma vez corrigida, deveria manter sua geometria ao longo do tempo, mas, devido a fatores internos e externos, sua condição geométrica sofre alterações. Deformações, folgas, alterações do material e colisões são alguns dos fatores que alteram a sua condição geométrica continuamente.

Essa instabilidade é particularmente maior nas máquinas de medir por coordenadas de grande porte do tipo braço horizontal, devido sua menor rigidez mecânica e às grandes dimensões dos eixos móveis da máquina. Essa menor rigidez favorece naturalmente a flexão do braço e da coluna da máquina, fazendo com que ao longo do tempo o braço e a coluna alterem sua posição como mostra a figura 3. A perpendicularidade entre os eixos é o tipo de característica mais afetado nessa instabilidade, e esta alteração provoca erros nos resultados de medições, principalmente na tarefa de controle de posição de um elemento na peça.

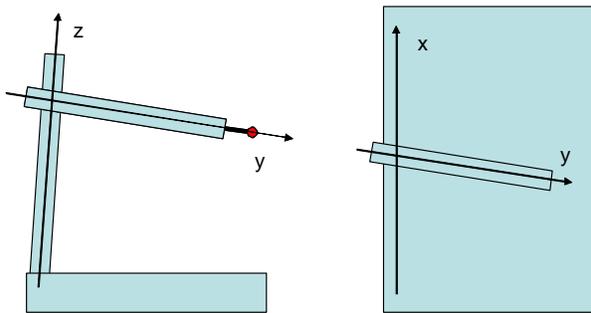


Fig. 3. Alterações geométricas típicas em máquina de medir por coordenadas de grande porte tipo braço horizontal

Dessa forma, é extremamente importante verificar no curto e médio prazo a geometria da máquina de medir por coordenadas para atestar a estabilidade. Esta avaliação é fundamental para ser garantida a confiabilidade metrológica dos resultados da medição e deve ser uma preocupação constante para quem zela pela qualidade daquilo que produz.

3. MONITORAMENTO DA ESTABILIDADE GEOMÉTRICA DAS GRANDES MMC's

O monitoramento da estabilidade da máquina permite detectar variações de curto prazo na sua condição

geométrica e, com isso, tomar ações preventivas e corretivas, tais como:

- Afastamento da máquina de serviço;
- Realização de manutenção;
- Identificação e eliminação de causas;
- Otimização de procedimentos de uso;
- Dentre outras.

Em máquinas de medir por coordenadas de pequeno porte são utilizadas medidas materializadas na forma de padrões metrológicos (blocos-padrão, padrões escalonados, peças de referência, etc.). Os procedimentos são práticos e os ensaios são rápidos e confiáveis.

No entanto em máquinas de grande porte, os procedimentos utilizados apresentam limitações de ordem econômica, operacional e metrológica. Estes métodos apresentam limitações típicas como:

- Necessidade de padrões de alto custo;
- Difícil manuseio dos padrões;
- Longos tempos de ensaio;
- Correlação dos resultados com alterações na geometria da máquina.

Os métodos mais comumente praticados (figura 4) constam de padrões de pequeno e médio porte medidos em muitas posições da máquina; grandes padrões dimensionais medidos em algumas posições; e interferômetro laser para avaliar a máquina em várias posições no espaço de trabalho da máquina.



Fig. 4. Métodos usuais para avaliação da estabilidade geométrica de máquinas de medir por coordenadas de grande porte

Estas limitações dificultam uma verificação mais freqüente da geometria da máquina de medir e, com isso, potencializam a ocorrência de problemas de confiabilidade das medições por alterações na geometria e exatidão do equipamento.

Idealmente um método de verificação deveria ser rápido e prático de aplicação, fornecer resultados confiáveis e conclusivos acerca do estado da máquina, além de apresentar boa viabilidade econômica. Para máquinas de medir de grande porte estes são objetivos ainda não atendidos satisfatoriamente pelos métodos clássicos de ensaio geométrico.

4. MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE GEOMÉTRICA ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DE ALVOS PERMANENTES NA ESTRUTURA DA MÁQUINA

Com o objetivo de avaliar de forma rápida e prática a geometria de máquinas de medir de grande porte, foi idealizado um método experimental que consta da medição da posição espacial de elementos fixados permanentemente na estrutura da própria máquina, e em posição estável ao longo do tempo.

A figura 5 ilustra o princípio envolvido no método. Dispositivos mecânicos já presentes na mesa da máquina ou instalados permanentemente sobre ela possuem geometrias como furos ou esferas que podem ter sua posição espacial determinada pela máquina. Estes elementos (alvos) têm sua posição medida no momento em que a máquina está em uma condição de referência, normalmente após a calibração e os ajustes de correção.

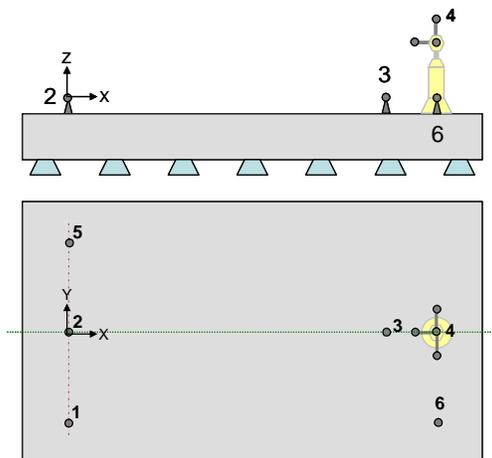


Fig. 5. Posicionamento dos alvos na estrutura da máquina

Estes “alvos” têm sua posição medida no momento em que a máquina está em uma condição de referência, normalmente após a calibração e os ajustes de correção. Após isso os alvos são medidos periodicamente em um intervalo definido pelo usuário, ou a qualquer momento diante de uma suspeita ou eventualidade como uma colisão.

As posições medidas são processadas e da comparação matemática da posição dos alvos com a condição de

referência se obtêm informações acerca do comportamento geométrico da máquina de medir. Os procedimentos de cálculo utilizam as coordenadas espaciais destes pontos de referência e transformam esses dados em informações conclusivas sobre a estabilidade geométrica da máquina.

A figura 6 mostra de forma resumida o fluxograma do método proposto. A escolha da posição dos alvos é realizada de modo que o monitoramento da sua posição ao longo do tempo possa identificar alterações nos principais erros da máquina, favorecendo a correlação entre alteração na posição com o problema na máquina.

Algumas qualidades potenciais deste método são:

- Detectar alterações na perpendicularidade entre os eixos;
- Evidenciar movimentações da coluna Z e do braço horizontal Y, que são os elementos de menor rigidez e mais suscetíveis a alterações causadas por colisões;
- Abranger uma grande área da máquina sem utilizar padrões dimensionais de grandes dimensões, nem requerer posicionamento de padrões em diversas posições;
- Ser de aplicação prática e rápida;
- Permitir uma verificação de curto prazo que evidencie uma colisão;
- Permitir um acompanhamento de longo prazo para acionar a manutenção.

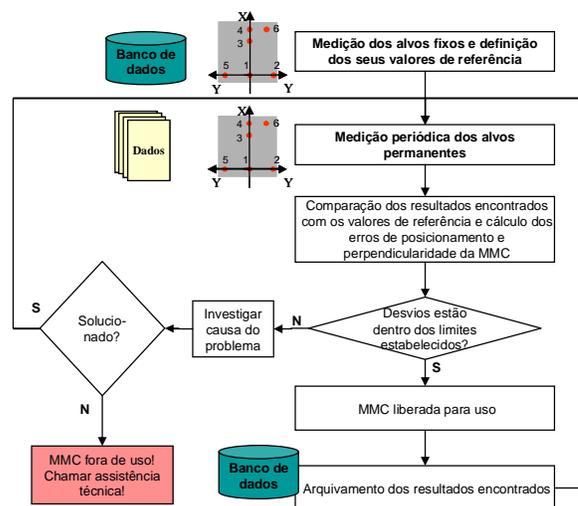


Fig. 6. Método de verificação proposto

Para que o método possa ser aplicado com segurança é necessário garantir que a posição relativa entre os alvos se mantenha estável ao longo do tempo, e que as condições de teste no momento das verificações sejam idênticas às realizadas no momento da avaliação de referência. Assim é necessário observar que:

- A temperatura da mesa no momento da medição esteja na mesma condição da avaliação de referência;
- A geometria da mesa seja estável ao longo do tempo;

- O procedimento de medição seja mantido ao longo de todos os testes de avaliação de estabilidade geométrica;
- A estratégia de medição seja a mesma (velocidade, ponta de medição, pontos apalpadados, etc.);
- Mesmo procedimento de ensaio (número de ciclos, processamentos, limpeza, etc);
- O esforço estático sobre a mesa seja idêntico;
- Ausência de pessoas caminhando sobre a mesa.

As principais fontes de incerteza sobre a avaliação com alvos permanentes residem na instabilidade da mesa da máquina e da posição dos alvos, em fatores como:

- Temperatura da mesa instável e não homogênea;
- Deformações da mesa por alívio de tensões do material;
- Alterações na posição dos alvos de referência;
- Alterações na geometria dos alvos de referência;
- Contaminação dos alvos com sujeira;
- Deformações da mesa por esforço estático e dinâmico,

Na etapa de validação do método para avaliação da estabilidade geométrica é fundamental comparar os resultados com ensaios realizados por métodos clássicos como padrões dimensionais, laser, etc. A comparabilidade de resultados deve ser realizada para validar o método antes de padronizá-lo e utilizá-lo de forma contínua.

5. APLICAÇÃO DO MÉTODO

O método proposto tem sido aplicado em fase experimental em uma máquina de medir de grande porte do tipo braço horizontal com duas colunas e mesa de ferro fundido, sendo utilizados como alvos de referência 1 esfera e 4 pinos localizados permanentemente na mesa da máquina. Cada uma das colunas possui alcance para medir um conjunto de 5 alvos, como mostrado anteriormente (figura 5).

Analisando a coluna direita da máquina, as esferas 1, 2 e 3 são medidas para criar um sistema de coordenadas local, sendo medidas também a esfera 4 e o alvo 6.

Toda a estratégia utilizada na medição de referência foi documentada e padronizada (temperatura da mesa, tipo de cabeçote de medição, estratégia de apalpação, posição dos pontos, etc.) para ser seguida nas próximas avaliações.

As coordenadas X, Y e Z dos alvos foram gravados e algumas distâncias e ângulos calculados, a saber:

- Distância entre esferas 1 e 2 na direção Y;
- Distância entre esferas 2 e 3 na direção X;
- Distância entre esferas 4 e 6 na direção Z;
- Ângulo entre linhas 12 e 23 no plano XY;
- Ângulo entre linhas 26 e 64 no plano XZ;
- Ângulo entre linhas 12 e 34 no plano YZ;

Estas dimensões e ângulos correspondem à condição de referência da máquina, contra a qual serão comparados periodicamente através de novas verificações.

A cada novo ensaio as posições dos alvos são medidas e da comparação de certas coordenadas especiais são avaliadas a estabilidade dos erros de posição em cada direção e o ângulo entre eixos. A tabela 1 mostra os erros

geométricos avaliados a partir das variações nas distâncias e ângulos:

Tabela 1. Erros geométricos avaliados

Varição ocorrida	Erro geométrico
(a) Distância Y2 – Y1	Posicionamento linear em Y
(b) Distância X3 – X2	Posicionamento linear em X
(c) Distância Z4 – Z6	Posicionamento linear em Z
(d) Ângulo 12-23 plano XY	Perpendicularidade XY
(e) Ângulo 26-64 plano XZ	Perpendicularidade XZ
(f) Ângulo 12-34 plano YZ	Perpendicularidade YZ

Uma planilha eletrônica foi desenvolvida para processar estas informações e fornecer um diagnóstico conclusivo acerca da estabilidade da máquina. Esta planilha fornece a alteração geométrica ocorrida e indica o tipo de movimento ocorrido na estrutura da máquina.

Os resultados mostrados ainda são preliminares, pois o histórico de avaliações ainda é curto, mas o método tem se mostrado promissor no acompanhamento da estabilidade da geometria da máquina.

Inicialmente foi realizada uma análise de variação de curtíssimo prazo para avaliar a repetitividade do processo. Nessa análise foram medidas as posições dos alvos repetidas vezes em um intervalo de dois dias. Cada avaliação foi composta por 03 ciclos de repetição sendo determinadas a média e a repetitividade dos resultados. Caso a repetitividade fique acima do valor esperado para a máquina o ensaio é analisado e repetido mais vezes.

Os resultados desses testes estão mostrados na tabela 2, e indicaram variações muito pequenas, abaixo da incerteza da máquina de medir, indicando uma boa repetitividade do próprio processo de avaliação. O ângulo XZ é acima de 90° em função da posição dos alvos medidos para construir as linhas sobre as quais se avalia a estabilidade da perpendicularidade entre os eixos X e Z.

Tabela 2. Avaliação de estabilidade de curtíssimo prazo

Teste	Â X-Y	Â X-Z	Â Y-Z	Dist X	Dist Y	Dist Z
Dia 1	89.934°	96.952°	89.998°	3999.910	1096.524	772.083
Dia 2	89.935°	96.951°	89.998°	3999.911	1096.523	772.080
Var.	0.001	-0.001	0.000	0.001	-0.001	-0.003

Posteriormente a esta avaliação inicial foram realizados testes em dias seguidos ao longo de um intervalo de 2 semanas (09 dias). Os resultados estão mostrados na figura 7 e indicam estabilidade geométrica da máquina de medir. A variação nos ângulos medidos, bem como a variação nas distâncias em X e Y foram muito pequenas. Percebeu-se maior instabilidade na variação do comprimento medido ao longo do eixo Z, mesmo assim dentro da incerteza de medição da máquina.

A avaliação da máquina de medir com alvos fixos tem possibilitado não somente avaliar a estabilidade geométrica da estrutura máquina, mas também para identificar a ocorrência de colisões ao medir peças em modo automático.

Para esta finalidade uma mesma esfera é medida antes e após a execução de programas de medição das peças. Caso sejam percebidas alterações acima de um valor determinado internamente, o sistema gera um alarme e uma investigação mais detalhada deve ser realizada. A figura 8 ilustra o método.

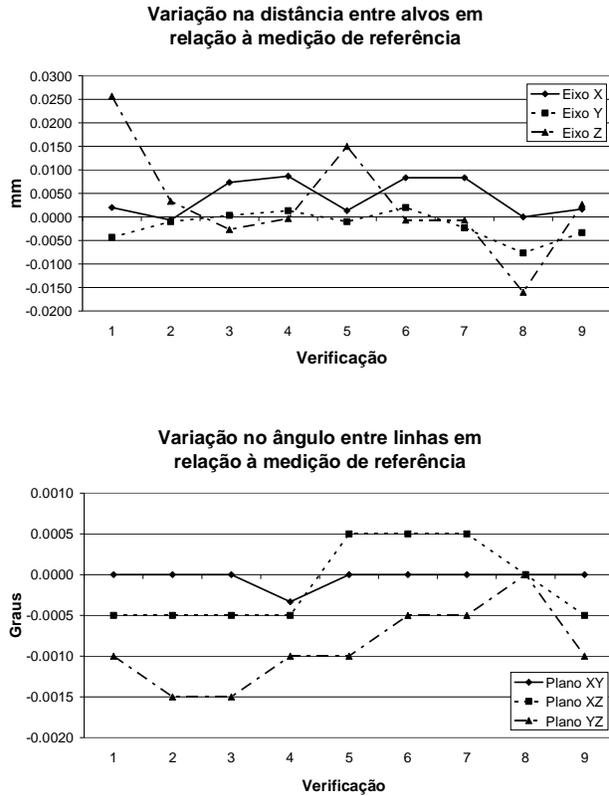


Fig. 7. Variação no posicionamento linear de cada eixo e no posicionamento angular entre eixos ao longo de duas semanas de monitoramento

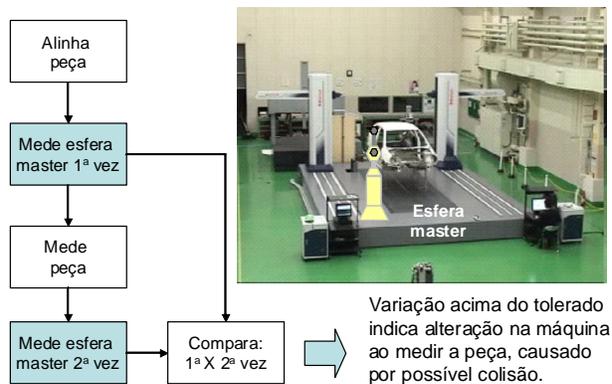


Fig. 8. Avaliação de colisões com dano estrutural na máquina

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou os resultados iniciais de um método experimental empregado para avaliar a estabilidade estrutural de máquinas de medir por coordenadas de grande porte empregadas no controle dimensional de estruturas veiculares.

O método emprega elementos geométricos fixos na estrutura da máquina para avaliar de forma prática e rápida erros ocorridos no curto e médio prazo na geometria da máquina.

No atual trabalho foram utilizados alvos e esfera fixados na mesa de uma máquina de medir por coordenadas tipo braço horizontal com dupla coluna. Pelo posicionamento e número de alvos/esferas escolhido, é possível avaliar a estabilidade da máquina nos erros de posição em cada eixo (X, Y e Z) e nos ângulos entre os eixos da máquina.

Neste trabalho os alvos e esfera foram posicionados de modo a privilegiar o monitoramento dos erros de posicionamento linear de cada eixo e no posicionamento angular entre os eixos. Caso haja interesse no monitoramento de outros erros geométricos (por exemplo: erros angulares *roll*, *pitch* e *yaw*) o número de alvos e/ou esferas e seu arranjo espacial pode ser re-configurado com este objetivo.

Por motivo de tempo (prazo), o presente estudo avaliou apenas um das colunas de uma CMM do tipo braço horizontal. Posteriormente será implementado o mesmo método em ambas as colunas da CMM.

AGRADECIMENTOS

General Motors do Brasil

REFERÊNCIAS

- [1] A. R. Sousa, "Formação Avançada de Metrologistas 3D – FORMA 3D". Apostila de curso, 2006.
- [2] International Organization for Standardization. ISO 10360, Geometrical Product Specifications (GPS) – "Acceptance and Reverification Tests for Coordinate Measuring Machines (CMM) – Part 2 CMMs used for measuring size", 2001.
- [3] Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. "Guia para a Expressão da Incerteza de Medição. 3 ed. brasileira. Rio de Janeiro: ABNT, INMETRO", 2003.
- [4] J. Bosch, "Coordinate Measuring Machines and Systems. Ed. Marcel Decker", 1995.