

ESTABILIDADE GEOMÉTRICA DE MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS OPERANDO EM PRODUÇÃO SERIADA

André Roberto de Sousa, asousa@ifsc.edu.br
Gustavo Schneider Vieira, g_sv@outlook.com

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

Resumo: Este artigo apresenta a proposta e os resultados parciais de um projeto de pesquisa desenvolvido com o objetivo de monitorar a estabilidade geométrica de máquinas de medir por coordenadas usadas em controle seriado de peças na indústria. Procedimentos de teste empregando padrões dimensionais auxiliados por aplicativos computacionais procuram monitorar a exatidão geométrica de máquinas de medir por coordenadas empregadas em controle seriado de peças na indústria para avaliar a estabilidade, emitir diagnósticos de conformidade e prever o intervalo de calibração adequado para o sistema de medição. O conceito do sistema, os padrões e procedimentos de ensaio avaliados, bem como resultados preliminares dos ensaios são descritos neste artigo.

Palavras-chave: Metrologia, Medição por coordenadas

1. INSTABILIDADES EM MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS

As máquinas de medir por coordenadas são largamente empregadas pelas indústrias para a caracterização geométrica de seus produtos e processos por causa de suas enormes potencialidades matemáticas, boas exatidão e automação. Neste ambiente de produção as máquinas de medir são vitais para as empresas alcançarem a excelência em qualidade e produtividade mas, para isso, a exatidão da medição é o condicionante crítico para as efetivas ações de controle de produtos e processos produtivos (Sousa et alii, 2008). Máquinas de medir com erros acima do esperado causam problemas e prejuízos para usuários da tecnologia, pois informações erradas atrasam o desenvolvimento dos produtos, levam a ações indevidas de ajuste em ferramentais de produção, processos e produtos, com sérias consequências técnicas e econômicas, desperdícios de material, tempo e energia (Fig. 1).

- Erros causados pela máquinas de medir nas fases preliminares do ciclo de vida do produto atrasam o processo de desenvolvimento e lançamento ao mesmo tempo em que geram produtos com qualidade e eficiência inferiores. Estes produtos irão consumir mais energia, durar menos, gerar mais resíduos, ser menos seguros, dentre outras não idealidades decorrentes de erros de concepção que acabam por comprometer a sustentabilidade do produto.
- Erros causados pelas máquinas de medir na fase de preparação da produção causam problemas em meios de produção como estampas, moldes, dispositivos de fabricação que serão transferidos aos produtos, potencializando enormes perdas pela alta capacidade de produção de certos processos.
- Erros causados pelas máquinas de medir na produção seriada provocam desajustes nos processos já que os resultados de medições das peças são utilizados para corrigir desvios nos processos de fabricação. O erro no diagnóstico das peças leva a ajustes indevidos nos processos.
- Ainda na fase de produção seriada, os erros de medição provocam erros no diagnóstico dos produtos, possibilitando a aprovação de lotes de peças erradas e a reprovação indevida de peças com dimensões dentro das tolerâncias de projeto.

Somando-se todos os potenciais problemas decorrentes de erros de medição das máquinas de medir, a garantia da confiabilidade metrológica das máquinas através do monitoramento geométrico preditivo tem o potencial de evitar enormes desperdícios e permitir um uso mais racional de recursos materiais e energético nos processos de manufatura, permitindo sistemas de manufatura mais sustentáveis. A melhoria de exatidão e a garantia da estabilidade geométrica das máquinas de medir por coordenadas tem o potencial de reduzir grandes desperdícios de material, tempo e energia nas empresas usuárias desta tecnologia.

Desenvolvimento de produto



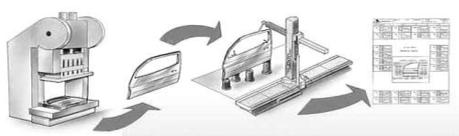
Atrasos no processo de desenvolvimento e lançamento
Produtos com qualidade e eficiência inferiores

Desenvolvimento de processo



Erros na aprovação de ferramental de produção
Transferência de erros de ferramental para as peças

Controle de processo e de produto



Ações indevidas de ajustes nos processos
Erros no diagnóstico dos produtos

Figura 1 - Consequências de erros de medição acima do esperado em máquinas de medir por coordenadas

2. CALIBRAÇÃO E CORREÇÃO DE ERROS EM MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS

Para assegurar que as máquinas operem com a exatidão esperada os usuários realizam calibrações e ajustes periódicos em suas máquinas, segundo procedimentos normalizados e periódicos, normalmente a cada ano. Nestes testes as máquinas são avaliadas quanto à sua exatidão em medir comprimentos calibrados posicionados no seu volume de trabalho, e alguns testes são realizados para a obtenção de erros paramétricos da máquina. Estes erros paramétricos (21 em uma máquina com cinemática cartesiana de 3 eixos) são utilizados para atualizar o mapa de erros armazenado no software ou hardware da máquina. Este mapa de erros é utilizado pela máquina para a correção de erros sistemáticos, melhorando de modo matemático a exatidão da máquina com o que se conhece como *CAA - Computer Aided Accuracy* (Hocken, 2012). Assim, anualmente as máquinas são calibradas e ajustadas (Fig. 2).

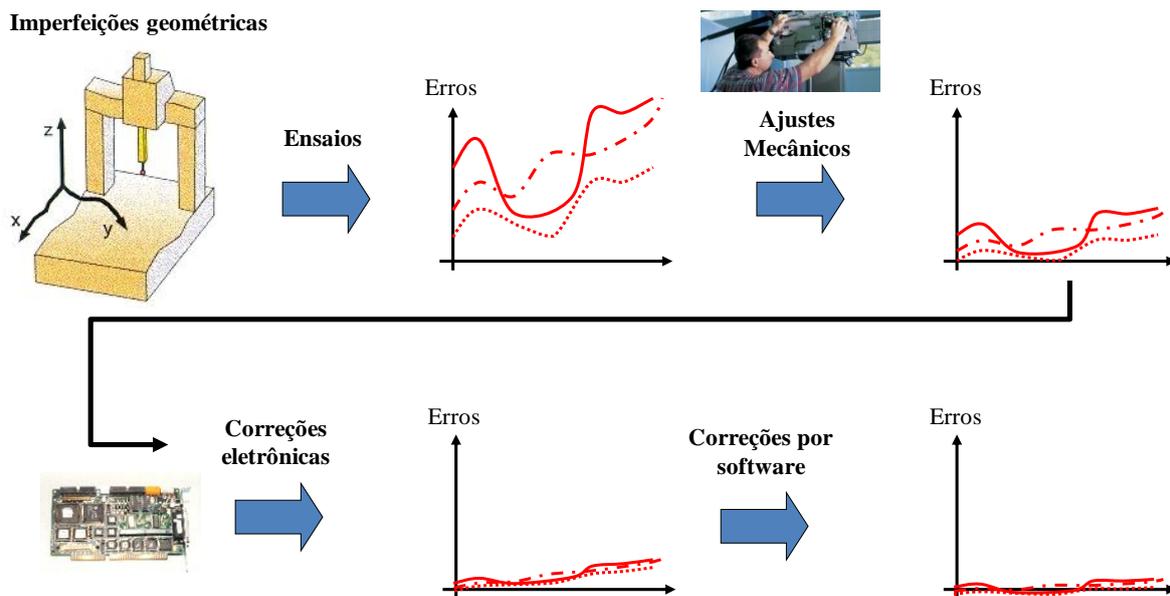


Figura 2 - Calibração periódica e correção de erros em máquinas de medir por coordenadas

Embora indispensáveis, estas calibrações e ajustes anuais não são suficientes para assegurar que as máquinas estejam operando com a exatidão esperada ao longo do tempo. É muito importante avaliar a estabilidade de curto prazo das máquinas de medir por coordenadas no período entre calibrações. Problemas como colisões, acomodação de solo, alterações estruturais, falha em componentes, dentre outros, podem fazer a máquina de medir alterar a sua geometria e passar a medir com erros acima da especificação (*MPE Maximum Permissible Error*, norma ISO10360-2) bem antes do momento da nova calibração e ajustes (Fig. 3). Muitas vezes esta percepção ocorre quando produtos desta empresa já passam a apresentar problemas de montagem devido a não conformidades dimensionais e geométricas causadas pelos erros da máquina de medir. As consequências técnicas, econômicas e políticas para a empresa podem ser muito sérias.

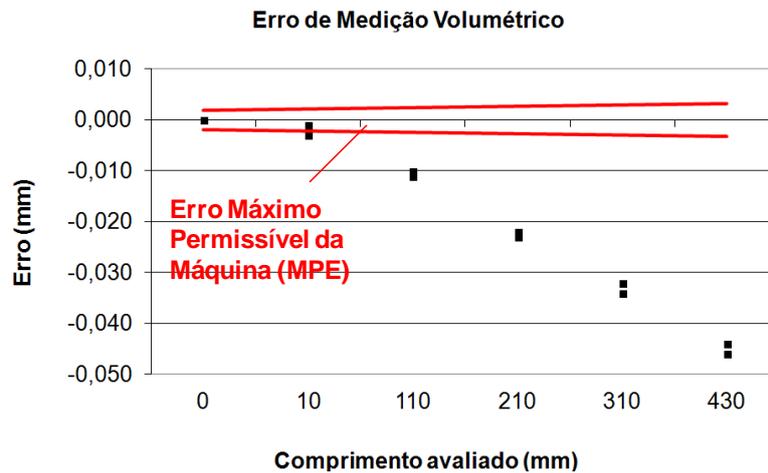


Figura 3 - Máquina de medir com erros acima do esperado antes do período de calibração

No outro extremo, existem máquinas que operam de modo muito controlado e que mantêm sua estabilidade geométrica em período bem superior a um ano. Máquinas novas, que operam em ambientes controlados, por profissionais cuidadosos e com menor taxa de utilização se enquadram nesta situação. Neste caso a calibração em intervalo anual incorre em custos e esforços que poderiam ser mais bem dimensionados à necessidade em questão. A Fig. 4 mostra os erros de uma máquina de medir após 1 ano da calibração e correção.

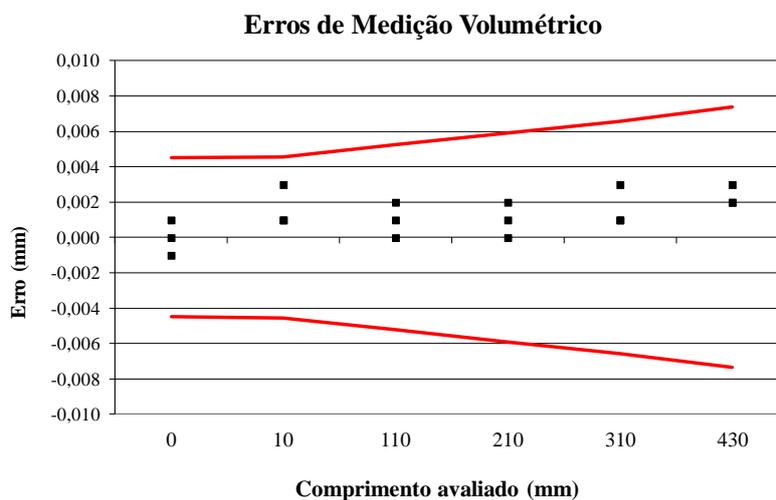


Figura 4 - Máquina de medir com alta estabilidade metrológica

No mercado há a constatação de que poucos usuários investigam a estabilidade de suas máquinas ao longo do tempo, devido à complexidade do tema, e à dificuldade de estabelecer métodos e por não possuir equipamentos adequados para testar esta estabilidade. Assim, de modo generalizado, pouco se investiga acerca de como as máquinas alteram o seu comportamento geométrico ao longo do tempo e é comum se encontrar máquinas com erros acima do permitido antes do momento da calibração e máquinas com erros abaixo do permitido no momento da calibração. A inexistência de um modelo de avaliação frequente da máquina e de previsão da sua estabilidade geométrica faz com que as empresas atuem de modo preventivo ou corretivo, relegando o modo preditivo.

3. MONITORAMENTO PREDITIVO DA ESTABILIDADE GEOMÉTRICA DE MÁQUINAS DE MEDIR

No cenário descrito no item anterior é muito importante a verificação frequente da exatidão das máquinas de medir por coordenadas. Esta verificação permite maior segurança na utilização das máquinas de medir e pode ser utilizada para avaliar a estabilidade com vistas ao melhor dimensionamento do intervalo de calibração e correção dos equipamentos, bem como identificar causas de instabilidades das máquinas de medir.

Para avaliar de modo periódico e preditivo uma máquina de medir por coordenadas é necessário dispor de um sistema de ensaio prático de aplicação e com a capacidade de revelar de modo realista o estado da máquina de medir. Para isso o sistema deve ser composto de (Fig. 5):

- **Padrões dimensionais** de alta exatidão com geometria adequada para testar a geometria da máquina, e que sejam práticos de utilização para os testes frequentes;
- **Procedimento de ensaio** bem definido e padronizado, que seja de aplicação rápida e prática de modo a motivar o usuário das máquinas de medir a testes de verificação frequentes.
- **Aplicativo computacional** com a capacidade de processar as informações obtidas nos testes, calcular os erros da máquina, emitir diagnósticos conclusivos acerca de sua geometria e manter um histórico de resultados para inferir sobre sua estabilidade geométrica ao longo do tempo.

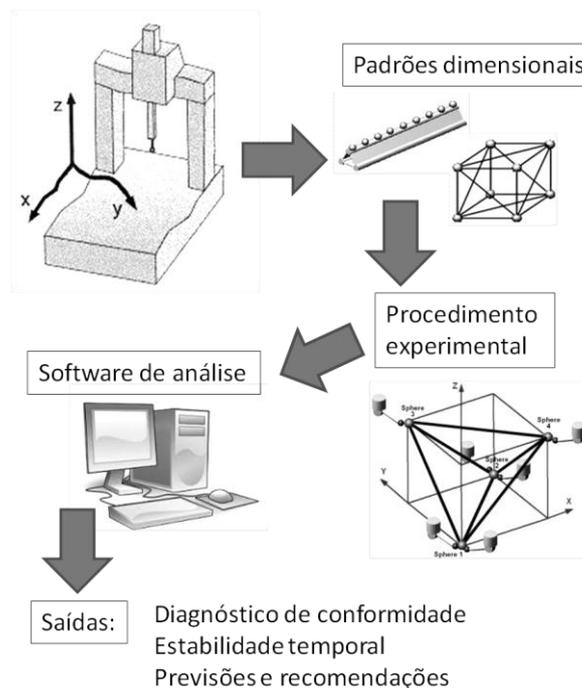


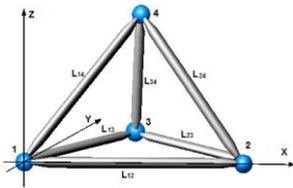
Figura 5 - Conceito de sistema de teste para verificação periódica da máquina de medir por coordenadas

O aplicativo computacional deve possuir um modelo que analise o histórico de variação geométrica da máquina com a capacidade de prever com antecedência o momento que a máquina tenha que passar por calibrações e ajustes. Além da definição do intervalo de calibração de modo mais realista, a informação acerca da estabilidade da máquina possibilitará informações valiosas para ações como:

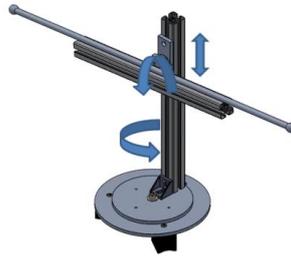
- Análise da adequação da robustez dos equipamentos às condições de uso;
- Identificação de problemas na utilização e conservação dos equipamentos;
- Estabelecimento de melhores práticas de utilização.

No mercado existem sistemas de ensaios desenvolvidos com este conceito e com estes objetivos. A figura 6 mostra alguns destes sistemas, empregando padrões como tetraedros, padrões escalonados, barra telescópica e outros. Alguns usuários de máquinas de medir por coordenadas têm desenvolvido seus próprios sistemas de teste e praticado ensaios de verificação periódica. A disponibilidade destes sistemas têm motivado alguns usuários a empreenderem ensaios de verificação periódica com excelentes resultados.

Tetraedro de fibra de carbono com 4 esferas em distâncias calibradas



Barra de esferas calibrada montada sobre dispositivo de movimentação



Sistema de teste orbital composto por barra calibrada montada sobre rótula esférica

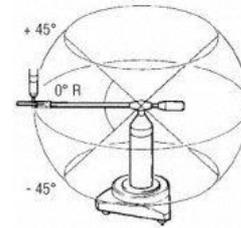


Figura 6 - Sistemas para verificação periódica da máquina de medir por coordenadas

Nestes sistemas os principais parâmetros metrológicos monitorados são o **erro de medição volumétrico** e o **erro de perpendicularidade** entre os eixos da máquina (Fig. 7). O **erro volumétrico** (ISO10360-2) é um parâmetro muito difundido no mercado, informado pelos fabricantes e entendido pelos usuários de máquinas de medir na indústria, sendo um parâmetro bastante representativo da conformidade geométrica da máquina, e muito prático de monitorar. A máquina estando fora da especificação pode representar a necessidade de chamada da assistência técnica para realizar uma manutenção e calibração no equipamento.

Os **erros de perpendicularidade** são indicativos da estabilidade geométrica das máquinas de medir. Idealmente os eixos e guias da máquina procuram materializar o conceito matemático do sistema de coordenadas cartesiano. Dessa forma, quanto mais próximos de 90 graus estiverem os eixos da máquina entre si, menores os erros de medição. Esta condição de perpendicularidade é obtida mediante ajustes mecânicos, eletrônicos e matemáticos e a sua manutenção ao longo do tempo requer que a máquina possua uma construção robusta e seja bem utilizada. Folgas, colisões, vibrações e emprego de velocidade e aceleração excessivas são causas da variação de perpendicularidade entre os eixos ao longo do tempo.

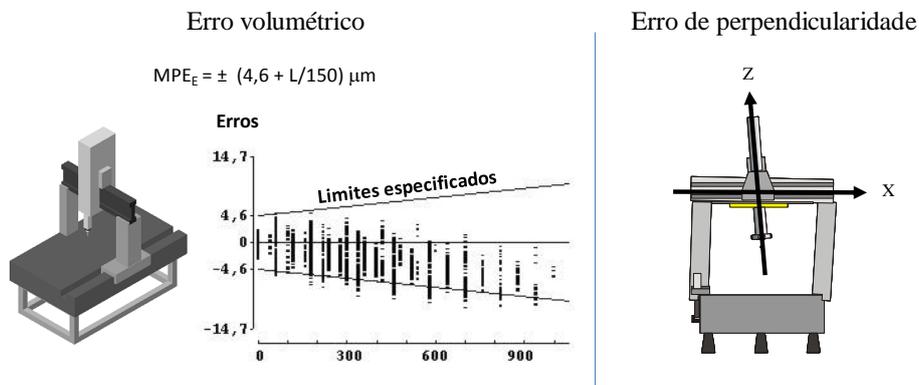


Figura 7- Erros avaliados nas verificações periódicas das máquinas de medir

4. APLICAÇÃO DE TESTES PERIÓDICOS EM MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS

Com o objetivo de implementar e avaliar a eficácia de um sistema de testes para monitoramento da estabilidade de máquinas de medir por coordenadas, está em desenvolvimento um projeto de pesquisa do IFSC em parceria com as empresas Tupy e Renishaw. Neste projeto algumas máquinas de medir por coordenadas estão sendo verificadas (Fig. 8) de modo frequente por diferentes métodos de ensaio, e os resultados obtidos a cada ensaio estão sendo utilizados para alimentar um modelo matemático com o objetivo de emitir diagnósticos de conformidade da máquina e avaliar a sua estabilidade com vistas ao dimensionamento do intervalo de calibração mais adequado para cada máquina.

No Laboratório de metrologia do IFSC está sendo avaliada uma máquina de medir por coordenadas, modelo LKG80-C com controlador Renishaw UCC e software Modus. Nesta máquina têm sido desenvolvidos os procedimentos operacionais de teste e a mesma tem sido avaliada diariamente pelos métodos de teste como forma de verificar a repetibilidade dos resultados dos ensaios. Além deste cenário mais controlado de operação, máquinas de medir por coordenadas operando de modo contínuo na medição de peças em ambiente industrial estão sendo avaliadas na empresa Tupy (Joinville-SC) para monitorar a sua estabilidade geométrica temporal. Estas máquinas operam em 3 turnos ininterruptos medindo blocos de motor de automóveis e outras autopeças.



Figura 8 - Máquinas de Medir por Coordenadas avaliadas

Para a verificação periódica destas máquinas estão sendo empregados dois sistemas disponíveis no mercado, a saber.

4.1 - Tetraedro com esferas

O tetraedro (*Tetracheck - Trapet Engineering*) é um sistema de testes fundamentado em um padrão tridimensional de fibra de carbono com esferas fixadas nos seus vértices (Fig. 9). As distâncias espaciais entre os centros das esferas são calibradas com incertezas de $\pm 0,4\mu\text{m}$. A medição das 4 esferas e a comparação das distâncias medidas com as calibradas permite a determinação dos erros de medição nos eixos X, Y e Z da máquina, bem como os erros de perpendicularidade entre estes eixos (XY, XZ e YZ). Um aplicativo computacional acompanha o padrão, permitindo o cálculo destes erros, o gerenciamento dos ensaios e o armazenamento dos resultados para avaliação da estabilidade temporal de máquinas de medir por coordenadas. O sistema pode ser aplicado em máquinas de medir manuais ou CNC.

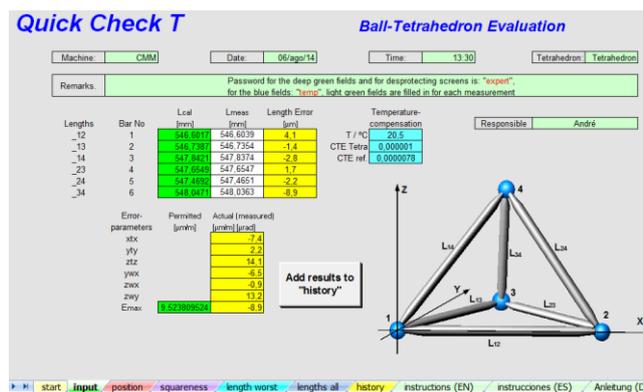
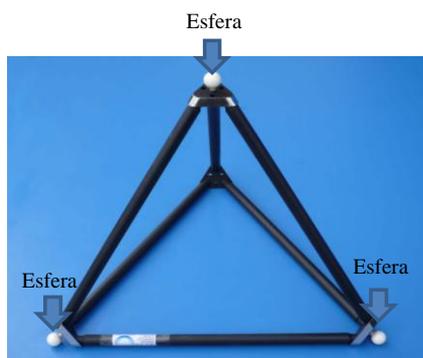


Figura 9 - Sistema de testes com tetraedro com esferas em posição calibrada

4.2 - Sistema de teste com barra orbital

O sistema de teste orbital (*Machine Checking Gage Renishaw*) mostrado na Fig. 10 consiste de uma barra de fibra de carbono que é movida orbitalmente pela própria máquina de medir por coordenada. A barra é apoiada em uma das extremidades em uma rótula esférica e na outra extremidade é apoiada na ponta de medição do apalpador da máquina de medir. Com essa configuração a máquina apalpa a extremidade da barra em diferentes orientações espaciais, movendo-se em trajetória polar. Dado que a distância entre as extremidades fixa e móvel da barra é fixa, qualquer variação no

comprimento medido é um indicador de erros de geometria da máquina de medir. O princípio possui a capacidade de revelar erros de medição nos eixos e no volume da máquina de medir por coordenadas, bem como erros de perpendicularidade entre os eixos. O sistema é destinado à avaliação de máquinas de medir CNC e possui um aplicativo computacional com a capacidade de gerenciamento do teste, geração do programa CNC de medição em DMIS, armazenamento e processamento dos erros, bem como avaliação de estabilidade das máquinas de medir.

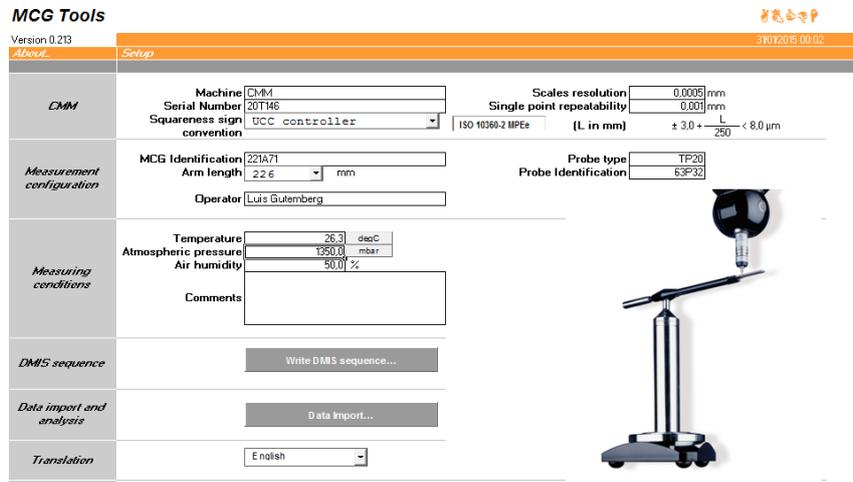


Figura 10 - Sistema de testes com barra orbital

5. RESULTADOS PARCIAIS

Os testes revelaram até o momento informações importantes para confirmar a boa exatidão das máquinas de medir avaliadas, e identificar problemas em algumas delas, bem como no ambiente de medição. Testes realizados com o tetraedro na máquina de medir do IFSC revelaram instabilidade nos erros de medição na direção Z da máquina de medir. Uma análise mais detalhada dos números permitiu relacionar este comportamento à proximidade excessiva da parte superior da máquina com uma das saídas de ar frio do sistema de climatização do laboratório (Fig. 11).

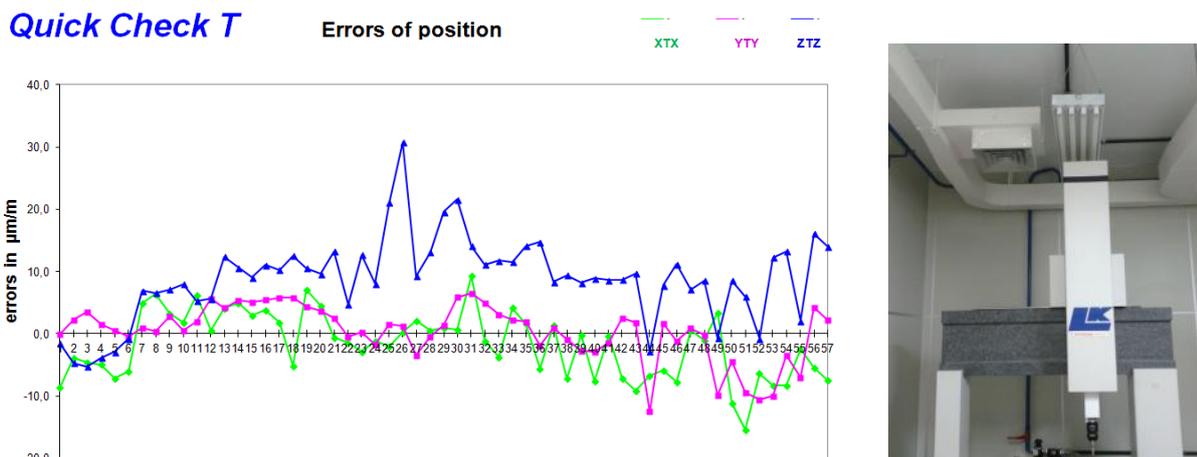


Figura 11 - Instabilidades do eixo Z causados por saída de ar condicionado excessivamente próxima

Esta mesma máquina apresentou grandes erros de perpendicularidade entre os eixos X e Y como se observa na Fig. 12, com erros da ordem de 15 μ rad. Foi necessária a calibração desta máquina e a atualização dos parâmetros de correção de erros geométricos para a solução destes desvios.

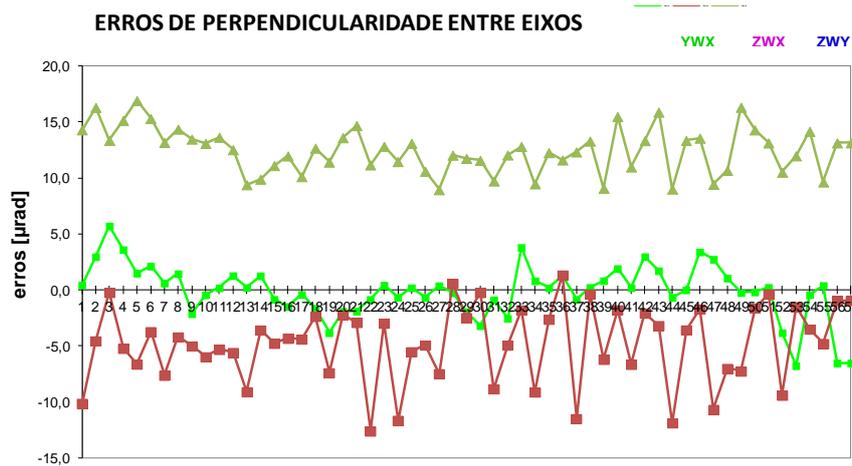


Figura 12 - Grande erro de perpendicularidade entre eixos X e Y

Em outra máquina avaliada também com o tetraedro se observou uma não conformidade no eixo Y da máquina, de modo bem destacado em relação aos outros eixos. Um parâmetro de correção dos erros nesta direção ficou desatualizado em decorrência de problema eletrônico ou computacional (Fig. 13). O sistema de testes permitiu avaliar também problemas no cabeçote de apalpação em uma das máquinas, da qual já se suspeitava haver problemas. Os resultados mostraram instabilidades em vários erros da máquina e a mesma foi afastada de serviço para assistência técnica. Todos os testes com o Tetraedro mostraram práticos de aplicação. O tempo de execução do teste em modo CNC leva cerca de 5 minutos para a sua realização.

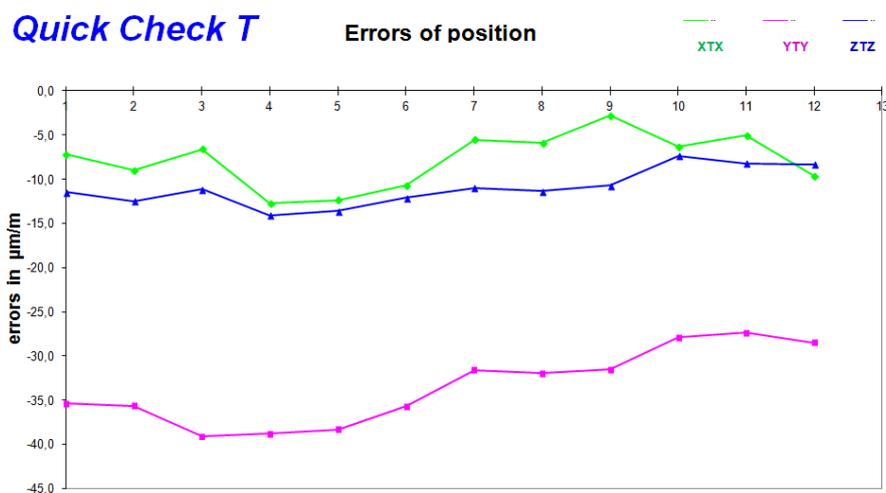


Figura 13 - Máquina com grande erro de escala no eixo Y

Os testes com o sistema MCG da Renishaw se mostraram bastante práticos de aplicação, com a capacidade de revelar informações geométrica relevantes da máquina de medir. Aplicado na máquina LK do laboratório de metrologia do IFSC o teste com o sistema ocorre em cerca de 3 minutos, e permitiu levantar informações para a correção matemática de alguns erros da máquina.

A Fig. 14 mostra os resultados de um teste com este sistema na máquina de medir LKG80-C do IFSC. Os gráficos polares permitem avaliar a forma com que os erros geométricos da máquina afetam a trajetória polar medida. Este teste permitiu identificar erros de escala na direção X e Y de, respectivamente, -5,5 µm/m e 4,0 µm/m. Embora maiores do que na direção Z, estes erros estão abaixo do erro máximo permissível para este modelo de máquina. O erro máximo de acordo com a especificação desta máquina de medir para o comprimento avaliado é de aproximadamente 15 µm/m. Os erros de perpendicularidade resultaram em valores também baixos nestes testes, que são realizados periodicamente.

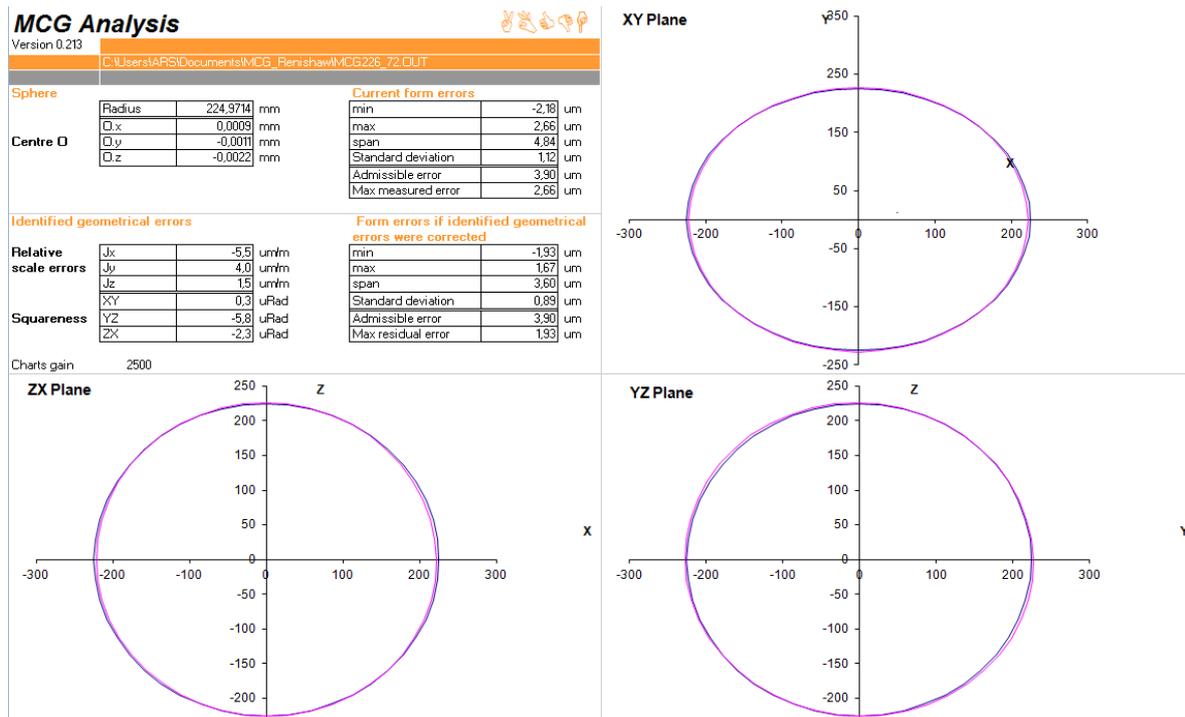


Figura 14 - Resultados do teste com o sistema MCG indicando boa conformidade de uma máquina de medir

Os dois métodos de teste mostraram-se consistentes quanto à repetibilidade nos resultados de ensaios em condições idênticas e têm sido realizados de modo frequente nas máquinas de medir avaliadas neste trabalho, com o objetivo de gerar dados numéricos para que seja possível avaliar a estabilidade temporal das máquinas de medir.

6. CONCLUSÕES

Para a segurança metrológica na operação das máquinas de medir por coordenadas é muito importante a manutenção dos seus erros dentro dos limites esperados para cada modelo de máquina. Neste sentido as calibrações e correções de erros periódicas, normalmente realizadas a cada ano, são indispensáveis. No entanto, estas calibrações não dispensam o usuário da realização de testes frequentes em suas máquinas, conhecidos como testes de verificação. Estes ensaios, seguindo procedimentos de teste rápidos, e empregando padrões dimensionais e aplicativos computacionais buscam obter informações significativas sobre o estado geométrico da máquina de medir. Com base no histórico de resultados de ensaios periódicos objetiva-se avaliar a estabilidade da máquina de medir e a adequação do intervalo de calibração proposto para o equipamento.

O estabelecimento de um modo preditivo de avaliação das máquinas de medir por coordenadas permite maior segurança na utilização da tecnologia e uma grande redução de custos da não qualidade (produtos ineficientes, refugos e retrabalhos, desperdícios de tempo, material e energia, perda de confiabilidade no mercado, etc.) e de custos da qualidade (calibrações e manutenções desnecessárias) com reflexos diretos na melhoria da sua competitividade.

Neste trabalho, procedimentos de teste foram aplicados em máquinas de medir empregando padrões dimensionais e aplicativos computacionais obtendo informações importantes sobre o estado geométrico das máquinas de medir. Com base no histórico de mais resultados de ensaios periódicos objetiva-se avaliar a estabilidade da máquina de medir e a adequação do intervalo de calibração proposto para o equipamento.

7. AGRADECIMENTOS

À Fundação Tupy S.A., parceira no desenvolvimento deste projeto, por disponibilizar seu ambiente e suas máquinas de medir para a realização de testes com sistemas de verificação de máquinas.

À Renishaw Latino Americana, parceira no desenvolvimento deste projeto, por disponibilizar sistemas para a de testes e assessorar a sua realização.

Ao CNPq pelo financiamento do projeto de pesquisa.

8. REFERÊNCIAS

Sousa, A.R.; Viana, C.; Lima, C.; Okazaki, S. *Avaliação da estabilidade geométrica de máquinas de medir por coordenadas de grande porte pela medição de alvos permanentes*. Congresso Internacional de Metrologia Mecânica - CIMMEC, Rio de Janeiro, 2008.

Hocken, R; Pereira, P. *Coordinate Measuring Machines and Systems*, CRC Press, 2012.

ISO10360-2, 2009 - *Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) - Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions*. International Organization for Standardization.

Ball Tetraedrons. Trapet Engineering. <http://www.trapet.de/3D%20artefacts.html>. Acessado em 25/06/2014.

Coordinate Measuring Machine Checking Gauge. Renishaw. <http://www.renishaw.com/en/mcg-systems--6674> Acessado em 25/06/2014.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EVALUATION OF GEOMETRIC STABILITY OF COORDINATE MEASURING MACHINES OPERATING AT SERIAL PRODUCTION

André Roberto de Sousa, asousa@ifsc.edu.br
Gustavo Schneider Vieira, g_sv@outlook.com

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

Abstract: This paper presents the partial results of a research project developed to monitor the geometric stability of coordinate measuring machines operating continuously for quality control of parts in serial production. Tests employing dimensional standards with software for error processing have been applied with the the objective of monitor the geometric accuracy of coordinate measuring machines and to evaluate its stability in order to predict the calibration interval. The system concept, standards and evaluated test procedures as well as preliminary results of the tests are described in this article.

Keywords: Metrology, Coordinate Measuring Machines

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