



ASPECTOS METROLÓGICOS E OPERACIONAIS DAS TÉCNICAS DE CALIBRAÇÃO PARA MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Tiago Leite Rolim

Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica
tlr@labmetro.ufsc.br

André Roberto de Sousa

Escola Técnica Federal de Santa Catarina
Gerência de Metal Mecânica
ars@certi.org.br

João Bosco Aquino Silva

Universidade Federal da Paraíba
Departamento de Engenharia Mecânica
jbosco@ct.ufpb.br

Resumo. *É crescente o uso das máquinas de medir por coordenadas (MMC's) no controle de qualidade da indústria manufatureira. Este fato está associado às características vantajosas deste tipo de equipamento nos aspectos de universalidade, flexibilidade, confiabilidade metrológica e automatização. Como qualquer sistema de medição, as MMC's devem apresentar rastreabilidade metrológica comprovada através de calibrações periódicas com o objetivo da verificação de sua performance em relação às especificações dos fabricantes ou, melhorias de tais especificações para aplicações especiais. Várias técnicas têm sido propostas nos últimos anos para avaliação dos erros envolvidos nas operações de medições com MMC's aplicando-se instrumentação variada. Neste trabalho são apresentados vários padrões utilizados nas metodologias para avaliação das componentes de erros das MMC's analisando-se suas características metrológicas e operacionais.*

Palavras-chaves: *medição por coordenadas, calibração, erros de medição, avaliação metrológica.*

1. INTRODUÇÃO

A exigência de qualidade nos produtos industrializados por parte do mercado consumidor interno e externo tem levado um número cada vez maior de empresas a buscarem implantação dos sistemas da qualidade tipo ISO 9000, QS 9000, VDA-6 ou, a certificação de dos seus produtos através das entidades competentes. Entretanto, para que os produtos alcancem níveis de qualidade exigidos pelo mercado, é necessário considerar a normalização e a confiabilidade metrológica como bases no controle dos processos de fabricação, Novaski et al (1998).

Disponíveis no mercado há mais de 30 anos, as máquinas de medir por coordenadas, MMC's, absorveram de forma significativa a evolução dos sistemas desenvolvidos nas áreas da mecânica, elétrica, eletrônica e informática sendo hoje em dia os instrumentos de medição dimensional mais avançados existentes no mercado. As características de flexibilidade, universalidade e confiabilidade metrológica permitem que as MMC's sejam utilizadas nos processos de fabricação

como ferramenta essencial para garantia da qualidade. Seu uso abrange basicamente três áreas distintas: medição de produtos convencionais, medição de produtos com geometria complexa e na calibração de padrões, Salsbury, (2000).

Como qualquer sistema de medição, que atenda aos padrões nacionais e internacionais de qualidade, as MMC's devem apresentar rastreabilidade metrológica comprovada através de calibrações periódicas para verificação de performance em relação às especificações dos fabricantes. Devido à complexidade dos sistemas (mecânicos, elétricos, ópticos, eletrônicos) envolvidos no seu funcionamento às MMC's são sistemas de medição que apresentam razoável complexidade para avaliação metrológica. Na prática erros e incertezas das medições realizadas com estas máquinas, raramente são apresentados separadamente, Bálamo et al (1996).

Analisando-se as principais normas internacionais sobre avaliação das MMC's, verifica-se que nenhuma delas envolve diretamente a palavra calibração nos seus títulos. Normalmente referem-se aos métodos de avaliação, com ampla variedade de propostas, dos parâmetros retilinearidade, perpendicularidade, erros angulares (rolamento, guinamento e tombamento), posicionamento linear, erros de apalpação e incertezas de medição de comprimento nos eixos (1D), nos planos (2D) e nas diagonais espaciais (3D). Todas essas características metrológicas são determinadas por distintas metodologias que sugerem uso de diferentes padrões, procedimentos, condições experimentais, amostragens, cálculos e correções. Os fabricantes indicam a performance metrológica das MMC's em relação aos erros máximo e mínimo nos termos: máximo desvio de um valor calibrado; garantia de que 95% dos valores medidos estão na faixa especificada, este é o critério de U95%; outros resultados de performance são citados como desvio padrão de medidas o qual descreve a posição dos valores medidos em relação a um valor médio das medidas e não de um valor calibrado, Phillips, (1995).

Mesmo com o conhecimento e entendimento aprofundado das principais fontes de erros das MMC's, de forma relativamente uniformizado, ainda não existe uma metodologia internacionalmente aceita capaz de fazer avaliação de todos os erros em cada grau de liberdade de movimento nas posições possíveis dentro do volume de trabalho da máquina com eficiência operacional.

Este trabalho apresenta as principais fontes de erros, os critérios de análise da performance e vários padrões existentes utilizados nos métodos para avaliação das MMC's analisando suas características.

2. CRITÉRIOS DE TESTES PARA ANÁLISE DE PERFORMANCE DA MMC'S

Os sistemas que compõem uma MMC operando de uma forma integrada, provocam erros que são responsáveis por uma incerteza no resultado das medições. Estes erros podem ser provocados por fatores que dependem da própria MMC ou, de outras causas. A relação entre esses erros pode ser analisada através de um diagrama apresentado na Fig. (1).

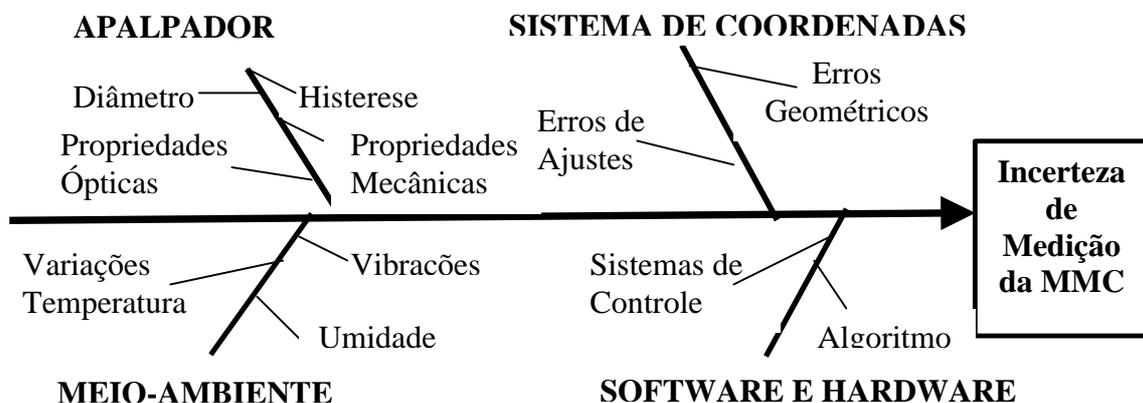


Figura 1. Diagrama dos Erros de uma MMC, (adaptado), Klen, 2000.

Dentro do contexto que envolve a análise da performance metrológica das MMC's três categorias de testes são empregadas considerando os objetivos desejados: inspeção / verificação periódica, aceitação e calibração, Kunzmann et al (1990); Noronha, (1994). A Fig (2) apresenta a caracterização de cada ensaio.

Aceitação	Ocorre Após Aquisição ou Manutenção
Estabelecido Por Contrato entre Fornecedor/ Comprador	<ul style="list-style-type: none"> - avalia comportamento geral quanto à incerteza de medição; - verificação das características da MMC conforme especificações contratuais; - levantar componentes de erros segundo os eixos; - toma como referência normas internacionais; - usa padrões rastreados <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> Resultado: Aceita / Rejeita </div>
Verificação	Ocorre em intervalos curtos de tempo
Executada pelo Usuário	<ul style="list-style-type: none"> - comprovação do atendimento da especificação de incerteza de medição e desempenho máquina; - ensaio simples e rápido - sem análise das causas dos erros nem de suas causas <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> Resultado : Atende / Não Atende Especificações </div>
Calibração	Realizada com Exigência acima da Incerteza de Medição Especificada – Ocorre em Intervalos de Tempos Estabelecidos.
Executada por Laboratórios Credenciados	<ul style="list-style-type: none"> - apresenta resultados quantitativos da incerteza de medição; - válida para todo volume de medição, todas disposições dos apalpadores e condições operacionais; - realizada de acordo com normas internacionais; - usa padrões rastreados. <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> Resultado : Determinação dos erros geométricos; avaliação da exatidão volumétrica da máquina; determinação dos erros relacionados com tarefa de medição. </div>

Figura 2. Categorias de testes para avaliação das MMC's.

3. CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS E OPERACIONAIS DOS MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DAS MMC'S

No rigor metrológico, a calibração consiste no conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição, os valores representados por uma medida materializada ou um material de referência e, os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões, VIM, (1993).

Devido à sua complexidade e universalidade, as MMC's apresentam restrições para serem calibradas com rastreabilidade aos padrões nacionais ou internacionais no sentido acima referido para maioria das suas tarefas de medição, (Noronha, 1994; Kunzman, 1994). Três vertentes podem ser seguidas na tentativa de superar esta limitação:

a) Obtenção direta do erro da MMC por comparação, medindo-se uma peça calibrada semelhante ao objeto a ser medido na mesma posição dentro do volume de trabalho da máquina. Da medição do padrão obtém-se o erro da MMC a ser corrigido na medição da peça. Neste sentido a MMC fica reduzida a um comparador. Este modelo na maioria dos casos não é exequível em função da necessidade de padrões para os diversos tipos de peças a serem medidas. No entanto, pode ser recomendado em determinadas situações quando for necessário manter a incerteza de medição em níveis mais baixos, porém, lento e oneroso.

b) Consiste na realização de ensaios para verificação do desempenho das MMC's segundo normas internacionais (ISO 10360-2; VDI/VDE 2617; CMMA; ANSI/ASME B89.1.12M; JIS B7 440; BS 6808; EAL-G17; CMONO), as quais desempenham papel importante na hora da negociação pois, são utilizadas pelos fabricantes para garantir junto ao usuário a especificação da incerteza de medição da máquina. Os ensaios de desempenho são realizados fazendo-se a medição de vários comprimentos em padrões calibrados colocados em diversas posições do volume de trabalho da máquina segundo eixos e diagonais, chegando-se assim a um valor de incerteza especificada. Assume-se que, se nas posições ensaiadas a MMC's satisfizer as exigências das normas para medição das tarefas padronizadas, seu desempenho será bom para outras tarefas dentro das especificações do fabricante.

c) Determinação das 21 componentes dos erros paramétricos da MMC, os quais isoladamente pouco acrescenta aos resultados da medição, principalmente como informação para o usuário final. O erro volumétrico total pode ser então obtido através de modelamento matemático com uso de matrizes homogêneas ou composição vetorial. O levantamento destes erros é utilizado por fabricantes quando da primeira calibração nas máquinas novas, execução de reformas ou, grandes serviços de manutenção ficando seus valores já indicados no software da máquina para compensações.

Das situações apresentadas apenas no uso da MMC como comparador está aplicado o método metrologicamente correto para avaliação de medidas em peças. Pela abrangência do problema de avaliação das MMC's é natural que existam iniciativas diferenciadas que buscam, através de diversos artifícios, meios de avaliação da qualidade nas medições com estas máquinas.

Nas últimas duas décadas várias metodologias têm sido apresentadas em normas internacionais ou, propostas por pesquisadores, para avaliação dos erros envolvidos nas operações de medições das MMC's, com aplicação de instrumentação variada, com diferentes procedimentos e condições experimentais escolhidas em função do tipo de ensaio desejado. A instrumentação utilizada para determinação dos erros nas MMC's pode ser proveniente de padrões corporificados, sistemas ópticos ou eletrônicos, (Trapet, E. et al, 1997; Kunzmann, H. et al, 1995; Sartori, S. 1995).

3.1 PADRÕES CORPORIFICADOS

De uso bastante comum para análise da performance das MMC's os padrões corporificados são utilizados em várias normas internacionais. Constituem-se de artefatos mecânicos calibrados com diversas geometrias e podem ser divididos em unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. São aplicados em ensaios realizados na condição real de uso da máquina, geralmente com baixo tempo de execução. Podem ser empregados nas avaliações de aceitação, verificação e calibração.

3.1.1 Padrões Corporificados Unidimensionais

Estes tipos de artefatos são os mais simples e práticos para análise da performance das MMC's. Os mais comuns são: blocos padrão, barras com esferas padrão escalonado e régua. Os blocos padrão, Fig. (3), prestam-se para medição de distintos comprimentos em posições e orientações variadas no volume de trabalho obtendo-se como resultado a incerteza de medição de comprimento (1D, 2D, 3D), determinação dos erros geométricos: posicionamento linear, perpendicularidade, rolamento e guinamento. As medições são rápidas, mas, a necessidade de variados tamanhos de blocos e, disponibilidade de bloco com máximo comprimento de 1,0 m são fatores limitantes para uso destes padrões.

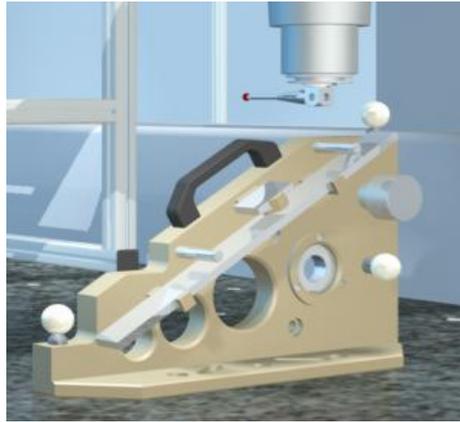


Figura 3. Bloco Padrão (Zeiss).

O padrão escalonado, Fig. (4) apresenta vantagem de uso na medição de comprimento devido à possibilidade de numa mesma posição, serem realizadas medidas de vários comprimentos. Disponibilizado em tamanhos de 0,5 m a 2,5 m, possibilita seu emprego para avaliação também de grandes máquinas, porém, com a desvantagem de dificuldade para transporte e manuseio, Noronha, (1994).



Figura 4. Padrão Escalonado (Koba).

A barra com esferas, Fig. (5), é um artefato simples de baixo custo para análise dos erros das MMC's através da medição da distância, calibrada, entre o centro das duas esferas em várias posições e orientações dentro do volume de trabalho da máquina. A execução do ensaio é rápida com custo baixo. Sua desvantagem de uso está associada à necessidade de barras com vários comprimentos. Indicada para realização dos testes de verificação.

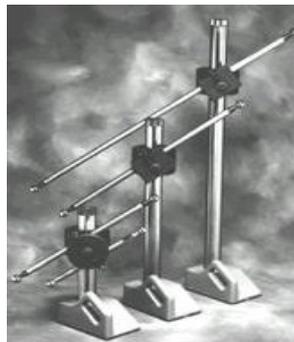


Figura 5. Barras com esferas, (Bal-Tecballs).

3.1.2 Padrões Corporificados Bidimensionais

Na forma de placas com furos ou esferas os padrões bidimensionais têm sido propostos para avaliação das MMC's. A posição do centro de cada esfera é conhecida com precisão, fazendo-a rastreada aos padrões de comprimento, Klen, (2000). A placas podem ser empregadas nos ensaios de aceitação, verificação e calibração das MMC's. A Fig.(6) apresenta placas com esferas.

Com as placas , é possível obter diferentes linhas de medição com diferentes comprimentos e direções para cada posição da placa no volume de trabalho. Como também, obter separadamente todas as componentes dos erros paramétricos da máquina. Os fatores limitantes ao uso das placas estão relacionados às suas dimensões, peso, demora na realização do ensaio e custo elevado. Atualmente as maiores placas são de 1,0 m x 1,0 m de modo que, para testes em MMC com dimensões maiores a placa deve ter suas posições superpostas. Novos materiais já estão sendo empregados na confecção de placas com dimensões de 1,5 m x 2,0 m, no entanto cuidados especiais devem ser observados no seu manuseio e transporte, Arriba, L., et al (1999).

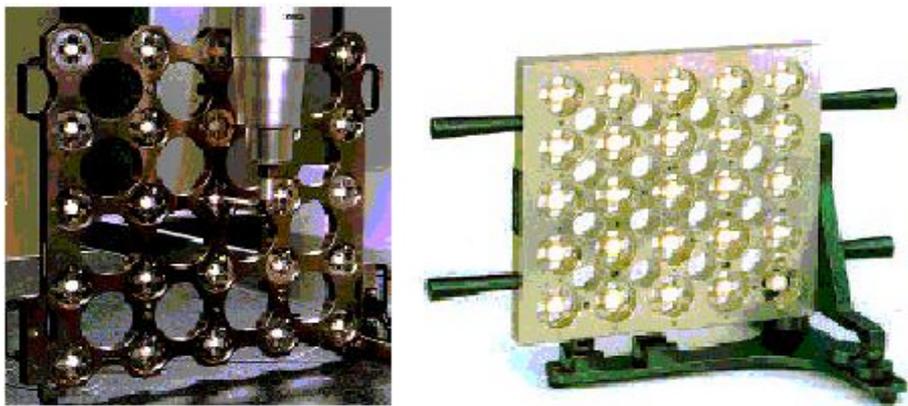


Figura 6. Placas com esferas. (Koba)

3.1.3 Padrões Corporificados Tridimensionais

A análise da performance das MMC's com padrões tridimensionais tem a vantagem de que, em poucas posições do padrão é possível fazer uma avaliação em três dimensões no volume de trabalho da máquina. Os padrões podem ser cubo com esferas nos vértices Fig. (7a) ou, estruturas com barras e esferas, Fig.(7b), as quais são mais vantajosas para uso em função da facilidade de manuseio transporte e calibração, (Klen, 2000; Silva, et al, 1997).

As esferas calibradas são padrões tridimensionais bastante utilizados para avaliação dos erros de apalpação.



Figura 7a

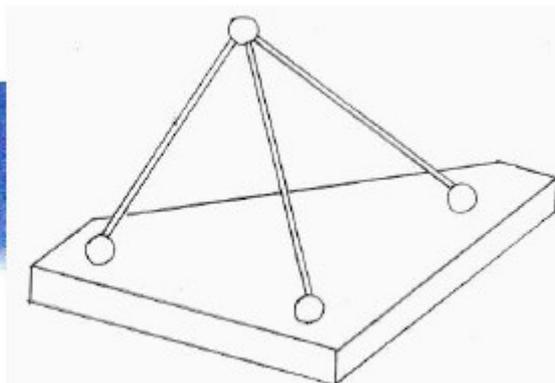


Figura 7b

Figura 7. Padrões Tridimensionais

3.2 PADRÕES ÓPTICOS

3.2.1 Laser Interferométrico

O instrumento de maior flexibilidade e maior exatidão para realizar os ensaios geométricos de posicionamento em MMC é o laser interferométrico, Veiga, (1997/). Suas características de uso são: capacidade de medir deslocamentos da ordem de décimos de micrometros até da ordem de dezenas de metros, capacidade de avaliação de grandes máquinas, avaliações dos erros de perpendicularidade, inclinações e retilidade, baixa incerteza de medição, bem aproveitado nos ensaios geométricos de posicionamento e histerese. As desvantagens de uso desta técnica estão associadas aos seguintes itens: equipamento caro, ensaio é demorado e necessita de operador especializado, não faz avaliação da máquina na sua totalidade (ensaio menos realista, interferômetro substitui o cabeçote), usado com maiores dificuldades operacionais para ensaios de retilidade, inclinações e perpendicularidade através de kits específicos.



Figura 8. Laser Interferométrico (Renishaw).

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o contexto atual que envolve os testes aplicados para avaliação das MMC's, como também alguns padrões empregados nas metodologias existentes, avaliando reais características metrológicas e operacionais.

O usuário da tecnologia da medição por coordenadas, no sentido de avaliação da performance da MMC, está atrelado a duas situações: fabricantes fazem especificação das MMC's com base em alguma norma garantindo que o equipamento atenda às especificações contratuais em todo o volume de trabalho para todas tarefas de medição, isto na entrega da máquina e também quando é solicitado para executar calibrações; os laboratórios independentes credenciados para execução de calibração nas MMC's, também adotam uso das normas especificadas pelo fabricante ou, na maioria dos casos aplicam métodos com procedimentos mais rigorosos em relação àqueles citados nas normas. Nas duas situações os métodos de calibração utilizados apresentam vantagens e desvantagens sem uma conciliação equilibrada que aponte diretamente benefícios de uso. Ainda não existe uma abordagem sobre a escolha da melhor metodologia a ser empregada na avaliação das MMC's que leve em consideração o tipo e tamanho da máquina, a incerteza de medição

especificada pelo fabricante, as tolerâncias das peças a serem medidas, complexidade do método de avaliação, como também a necessidade de conhecimento mais aprofundado sobre a incerteza de medição da máquina, de modo que, exista um equilíbrio favorável entre os parâmetros: custos de calibração, confiabilidade metrológica nos resultados e o tempo de execução.

Neste sentido está em fase de desenvolvimento, dentro do programa de pós-graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal da Paraíba e Laboratório de Metrologia e Automatização da Universidade Federal de Santa Catarina, uma proposta de tese que pretende chegar a uma metodologia para indicação do melhor método de calibração para uma MMC capaz de atender os requisitos citados.

5. REFERÊNCIAS

- Novaski, O. e Franco, S.F., 1998, "Qualidade no laboratório de Metrologia: avaliação da incerteza." Máquinas e Metais, N° 390, julho, pp92-102
- Miguel, P.A.C., King, T. G., 1995, Co-ordinate measuring machines. Concept, classification and comparison of performance tests. International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 12 N° 8, pp48-63
- Salsbury, J. G., 2000, Máquinas de Medição de Coordenadas: testes, calibração e incerteza. Instrumentação Metrologia, Ano II, N° 8, outubro, pp56-66
- Bálsamo, A., Sartori, S., 1996, Toward Instrumnet-Oriented Calibration of CMM's, Annals of the CIRP, Vol. 45 /1/, pp479-482
- Phillips, S.D., 1995, Performance Evaluations, Form Coordinate Measuring Machines and Systems, Cap. 7. Edited by John Bosch, Published by Marcel Dekker Inc.
- Klen, E.R., 2000, Calibração de Máquinas de Medir por Coordenadas Utilizando Placas de Esferas - Dissertação, Mestrado em Metrologia Científica e Industrial, UFSC, Florianópolis, SC, 103p.
- Kunzmann, H., E. Trapet, Wäldele, F., 1990. A Uniform Concept for Calibration, Acceptance Test, and Periodic Inspection of Coordinate Measuring Machines using Reference Objects, Annals of the CIRP Vol. 39 /1/
- Noronha, J.L., 1994, Qualificação de Máquinas de Medir por Coordenadas com Padrões Corporificados, - Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, 123p.
- VIM, 1993, International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology.
- Trapet, E., Wäldele, F., 1997, Coordinate Metrology Flexibility in Conflict with Accuracy? Seminário Internacional da Metrologia para Controle da Qualidade, Agosto, Florianópolis, SC.
- Kunzmann, H., Ni, J., Wäldele, F., 1995, Accuracy Enhancement, Coordinate Measuring Machines and Systems, Cap. 10. Edited by John Bosch, Published by Marcel Dekker Inc.
- Arriba, L., Trapet E., Bálsamo, A., 1999, Methods and Artifacts to Calibrate Large CMM's, IN Proceedings of the 1st International EUSPEN Conference, Bremem, Vol. 2, S.391-394
- Veiga, C. L. N., 1997, Tecnologia de Medição por Coordenadas – Verificação Calibração Apostilha de Curso – Fundação CERTI – Florianópolis, SC

TITLE: METROLOGICAL ASPECTS AND OPERATIONAL OF THE TECHNIQUES OF CALIBRATION FOR COORDINATE MEASURING MACHINES

Tiago Leite Rolim

Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica

tlr@labmetro.ufsc.br

André Roberto de Sousa

Escola Técnica Federal de Santa Catarina
Gerência de Metal Mecânica

ars@certi.org.br

João Bosco Aquino Silva

Universidade Federal da Paraíba
Departamento de Engenharia Mecânica

jbosco@ct.ufpb.br

Abstract. The use of the coordinates measuring machines (CMMs) in the control of quality of the work pieces of industry has increased strongly in the last years. This fact is associated to the advantageous characteristics of this equipment in the aspects, of flexibility, precision and automation. As any other measuring system, the CMMs should present traceability assured through periodic calibrations its performance compared to the manufacturer specifications, improvements of such specifications for special applications. Several techniques have been proposed in the last years for evaluation of the geometric errors involved in the operations of measurements with CMMs applied to varied artifacts. In this work several standards and methodologies for the accuracy evaluation of the CMMs are presented, and the metrological and operational aspects analyzed.

Keywords: coordinate measuring machines, calibration, gauges, geometric errors.