



## Um Padrão dimensional desmontável para Ensaio Geométricos de Máquinas de Medir por Coordenadas e Centros de Usinagem

André Roberto de Sousa  
CEFET-SC – Núcleo de Mecânica  
ars@certi.org.br

Carlos Alberto Schneider  
UFSC – Engenharia Mecânica  
cas@certi.org.br

**Resumo.** Um padrão dimensional desmontável foi projetado, construído e testado para ser utilizado com vantagens metrológicas e operacionais na calibração de máquinas de medir por coordenadas e ensaios geométricos de centros de usinagem. Aplicando o princípio de montagem cinemática, um padrão vertical com elementos que se montam precisamente sobre os outros foi testado e os resultados demonstram um bom potencial para a sua utilização como um padrão dimensional. Como os ensaios são realizados na mesma linha de deslocamento do eixo vertical da máquina sendo testada, os erros de 1ª ordem são praticamente eliminados, uma vez que o ensaio com o padrão desmontável obedece ao princípio de Abbe.

**Palavras-chave:** Metrologia, Máquina-ferramenta, Ensaio Geométrico

### 1. INTRODUÇÃO

O princípio clássico do apoio cinemático ou montagem cinemática define que um corpo pode ser apoiado de tal forma que a sua posição é definida de forma inequívoca, permitindo que esse corpo seja retirado e, quando recolocado, fique na mesma posição inicial. Para tanto, os elementos de contato entre o corpo e a estrutura que o suporta devem apresentar uma geometria tal que restrinja todos os seis graus de liberdade possíveis. Exemplos clássicos de 3 esferas apoiadas sobre 3 rasgos em “V”, ou de 3 esferas apoiadas sobre prima, cone e plano são comuns em aplicações como montagens ópticas, e dispositivos de fixação de peças para a usinagem e para a medição por coordenadas. Nessas situações, a repetitividade de posicionamento em curto prazo é garantida pelo apoio isostático.

Nesse trabalho essa precisão de reposicionamento é aplicada em um padrão dimensional desmontável, para utilização na calibração de Máquinas de Medir por Coordenadas e Ensaio Geométricos em Centros de Usinagem, com vantagens metrológicas e operacionais sobre outros tipos de padrão utilizados para os mesmos testes.

A motivação para o desenvolvimento desse padrão ocorreu por causa de certas dificuldades no ensaio dos eixos verticais de máquinas de medir por coordenadas e de centros de usinagem. Quando padrões clássicos, como padrões escalonados ou placa de esferas, são utilizados há a necessidade de utilizar prolongamentos horizontais ao apalpador de medição, e medir o padrão em uma linha de deslocamento paralela à linha de deslocamento do eixo, contrariando ao princípio de Abbe (Pfeifer, T., 1998) e provocando erros de 1ª ordem.

No projeto do padrão, na especificação de materiais e na fabricação, foram tomados cuidados para garantir a sua termo-simetria e para que a sua repetitividade de longo prazo fosse garantida. A calibração, realizada em uma máquina de medir por coordenadas Zeiss ZMC550, desmontando e montando o padrão, permitiu verificar uma repetitividade em torno de 1 µm, próximo da incerteza da própria Zeiss.

O padrão, uma vez calibrado, foi utilizado para o ensaio geométrico de um centro de usinagem CNC equipado com um apalpador de medição, também ensaiado com técnicas clássicas (laser interferométrico, régua e esquadro). Os resultados permitiram concluir pelo grande potencial de aplicabilidade do princípio do apoio isostático para padrões dimensionais: resultados idênticos ao laser foram obtidos em 1/10 do tempo e com 1/8 do custo. Esses e outros aspectos relacionados a esse padrão são relatados nesse artigo.

## 2. O PRINCÍPIO DO APOIO CINEMÁTICO

A posição de um corpo no espaço é definida de forma inequívoca quando os 6 graus de liberdade desse corpo são restringidas pelos elementos geométricos que o apóiam. A figura 1 ilustra algumas dessas situações. Esse princípio tem sido largamente utilizado em aplicações de mecânica de precisão, como em montagens ópticas, dispositivos de fixação para usinagem e controle dimensional (Newport Inc, 1997).

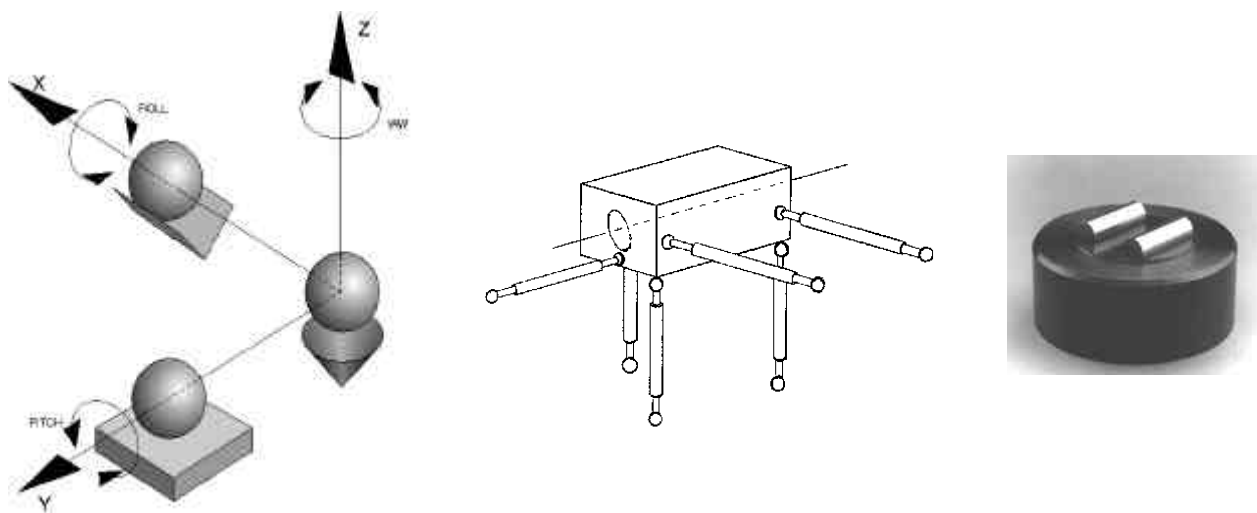


Figura 1. Exemplos de montagens cinemáticas

Em todas essas situações, requer-se do apoio cinemático uma boa repetitividade de posicionamento, mas somente durante o período que durar o processo de medição, usinagem, etc. A repetitividade de longo prazo não é um requisito nessas montagens. Essa estabilidade de longo prazo é prejudicada em função, principalmente, de deformações plásticas nas áreas de contato dos componentes mecânicos da montagem. Essas deformações durante as montagens e desmontagens, continuamente, fazem com que a posição de fixação cinemática se altere com o tempo.

## 3. A CONCEPÇÃO DE UM PADRÃO CINEMÁTICO DESMONTÁVEL

Motivado pela dificuldade metrológica de adaptar uma haste horizontal ao apalpador no ensaio de eixos verticais de Máquinas de Medir por Coordenadas e Centros de usinagem empregando padrões clássicos, foi desenvolvido um novo padrão corporificado, que pode ser descrito como um padrão desmontável, com remontagem cinemática. O padrão possui várias esferas fixadas no centro de uma estrutura triangular, cujas colunas de suporte se apóiam em montagem cinemática proporcionada por 3 rasgos em “V”, fixados na base triangular inferior (figura 2) (Sousa, 1999).



**Figura 2. Concepção do Padrão vertical desmontável**

As posições dos centros das esferas são calibradas em uma máquina de medir por coordenadas de referência. Nessa calibração, as posições das esferas são medidas à medida que o padrão é montado e desmontado, em vários ciclos de medição.

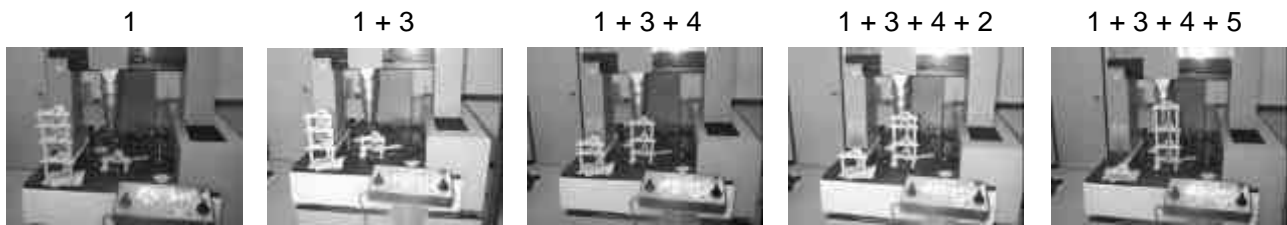
Uma vez calibrado, o padrão é utilizado no ensaio de máquinas, sendo medido de forma semelhante ao procedimento de calibração. Durante o ensaio, à medida que o apalpador mede as esferas, esta parte do padrão é retirada e a máquina mede as esferas inferiores, de forma que o eixo árvore fica alinhando com a linha média que une o centro das esferas, sem a necessidade de adaptação do apalpador, e fazendo o ensaio atender ao princípio de Abbe. As posições calibradas são comparadas com as posições medidas e, a partir dessa comparação, são determinados os erros de posicionamento, retilinearidade e perpendicularidade nos 2 planos verticais de trabalho da máquina. Os comprimentos das colunas de cada base são escalonados de forma que, combinando diferentes montagens, é possível verificar 75 posições ao longo da faixa de ensaio de 0 a 400 mm.

Para otimizar a estabilidade do padrão, foram utilizados materiais de alta resistência ao desgaste e à deformação nos elementos de contato, além de cuidados para manter a estrutura do conjunto o mais termo-simétrica possível. Para minimizar a incerteza no posicionamento das esferas, foram empregados elementos de referência com desvios de esfericidade inferiores a  $0,3 \mu\text{m}$ .

#### **4. A CALIBRAÇÃO DO PADRÃO**

A calibração do padrão foi realizada em uma máquina de medir por coordenadas Zeiss ZMC550 pertencente ao Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI. Nesse processo, procurou-se medir a posição espacial das esferas em relação a um sistema de coordenadas fixo no padrão, estabelecido através de esferas de alinhamento fixadas à base inferior do padrão.

Os ensaios na máquina Zeiss tiveram o objetivo inicial de avaliar a repetitividade na posição das esferas, após cada montagem/desmontagem do padrão. Nesses ensaios, o padrão foi sucessivamente montado e desmontado e a posição das esferas medidas pela máquina. Com esse procedimento, procurou-se avaliar principalmente se a montagem cinemática garantida pelas esferas e rasgos em “V” se mostravam confiáveis e estáveis. A figura 3 mostra esse procedimento e uma repetitividade típica obtida ao longo de 3 ciclos de medição. Pelos resultados, observa-se uma excelente repetitividade no reposicionamento, indicando um bom potencial de aplicabilidade do dispositivo para aplicação como padrão dimensional.



		Ciclos e Desvios [mm]									
		I	V	I	V	I	V	I	V	I	V
BASES		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>1</b>	<b>X</b>	-0,4	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,2	0,0	0,2	-0,3
	<b>Y</b>	-0,3	0,1	0,0	0,0	0,3	0,0	0,1	0,1	-0,1	-0,2
	<b>Z</b>	0,2	0,1	-0,1	-0,2	-0,1	0,1	-0,1	0,1	0,0	0,0
<b>1 + 3</b>	<b>X</b>	0,2	0,0	-0,2	0,0	-0,1	0,2	-0,1	0,1	0,1	-0,2
	<b>Y</b>	0,3	-0,2	-0,2	0,2	0,0	-0,2	0,4	0,0	-0,3	0,0
	<b>Z</b>	0,2	-0,1	0,2	0,1	0,0	-0,4	-0,3	0,2	0,1	-0,1
<b>1 + 3 + 4</b>	<b>X</b>	0,2	-0,7	0,0	1,1	-0,1	-0,4	-0,1	1,0	0,1	0,1
	<b>Y</b>	0,2	-0,4	-1,0	0,2	0,5	-0,2	-0,3	0,5	0,2	0,2
	<b>Z</b>	0,3	-0,1	0,3	-0,2	-0,1	-0,6	0,1	-0,1	0,2	0,2
<b>1 + 3 + 4 + 2</b>	<b>X</b>	-0,4	-0,4	-0,4	0,6	-0,1	0,2	0,2	-0,1	0,2	0,2
	<b>Y</b>	-1,5	0,0	0,5	0,6	0,7	0,5	-0,3	0,0	-0,2	-0,2
	<b>Z</b>	-0,1	-0,2	0,1	0,2	0,6	-0,3	0,2	0,0	-0,3	-0,2
<b>1 + 3 + 4 + 5</b>	<b>X</b>	0,2	-0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	-0,2	-0,3	0,1	0,1
	<b>Y</b>	0,7	0,7	-0,6	0,2	-0,2	0,2	-0,5	-0,2	-0,2	-0,1
	<b>Z</b>	0,1	0,1	0,3	-0,1	-0,4	-0,3	-0,2	0,1	0,1	0,2

**I = Ciclo ascendente**

**V = Ciclo descendente**

**Figura 3. Calibração do padrão desmontável: desvios em relação à posição média**

Comprovada essa boa repetitividade, foi realizada a calibração do padrão na mesma Zeiss, com o objetivo de determinar a posição espacial de cada esfera de medição em relação ao sistema de coordenadas local, estabelecido através de esferas de alinhamento fixadas à base inferior do padrão. O procedimento é semelhante ao do ensaio de repetitividade, mas agora alguns cuidados adicionais como a medição de temperatura da peça e a aplicação de estratégias de medição como o método de comparação com um bloco padrão e/ou o rebatimento do padrão em torno do eixo Z, são recomendados (Trapet, 1991).

Do processo de calibração resultou um conjunto de dados contendo a posição espacial calibrada de cada esfera do padrão desmontável, nas configurações de montagem utilizadas no processo de calibração. A incerteza de calibração do padrão, ou seja a incerteza na posição das esferas foi estimada em  $\pm 2,2 \mu\text{m}$ , obtida considerando as fontes listadas no balanço de incerteza na tabela 1.

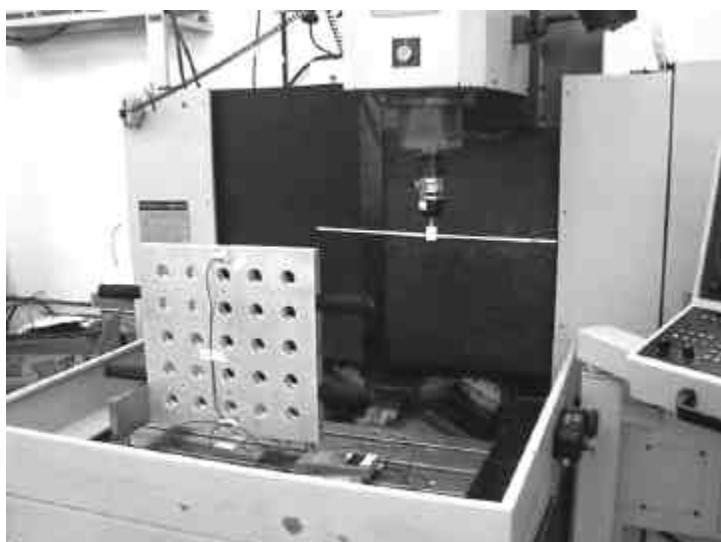
Esses dados calibrados são introduzidos em um software de ensaio e, durante a utilização do padrão desmontável como um padrão dimensional, esses dados calibrados são comparados com os dados medidos na máquina sendo testada. Como resultado dessa comparação são obtidos os erros de posicionamento linear (zpz), os erros de reticidade nas direções X (ztx) e Y (zty), além dos erros de perpendicularidade entre os eixos Z e X (zwx), e entre Z e Y (zwy).

Fonte de Incerteza	Incerteza [mm]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [mm]	Graus de liberdade
Reposicionamento	1,7	Normal	1	0,85	9
Resolução	0,1	Retangular	1	0,06	$\infty$
Variação de temperatura	0,4	Retangular	1	0,23	$\infty$
CMM	1,4	Normal	1	0,70	$\infty$
				Incerteza Combinada	1,1
				Incerteza Expandida (95%)	2,2 mm
					54 (Efetivo)

**Tabela 1. Balanço de Incerteza do padrão vertical desmontável**

## 5. A APLICAÇÃO DO PADRÃO CALBRADO NO ENSAIO GEOMÉTRICO DE UM CENTRO DE USINAGEM VERTICAL

Após a calibração, o padrão foi utilizado no ensaio geométrico dos planos de trabalho verticais de um centro de usinagem equipado com um apalpador de medição. Nesse tipo de máquina existe uma dificuldade se o ensaio for feito com padrões clássicos como um bloco-padrão, um padrão escalonado ou uma placa de esferas. Em função da largura da coluna Z da máquina, há a necessidade de colocar o padrão longe da linha de deslocamento do eixo Z, o que aumenta consideravelmente a incerteza dos resultados do ensaio. A figura 5 mostra bem esse problema, ao se tentar ensaiar uma máquina com um padrão bi-dimensional (placa de furos) (Sousa, 2000).



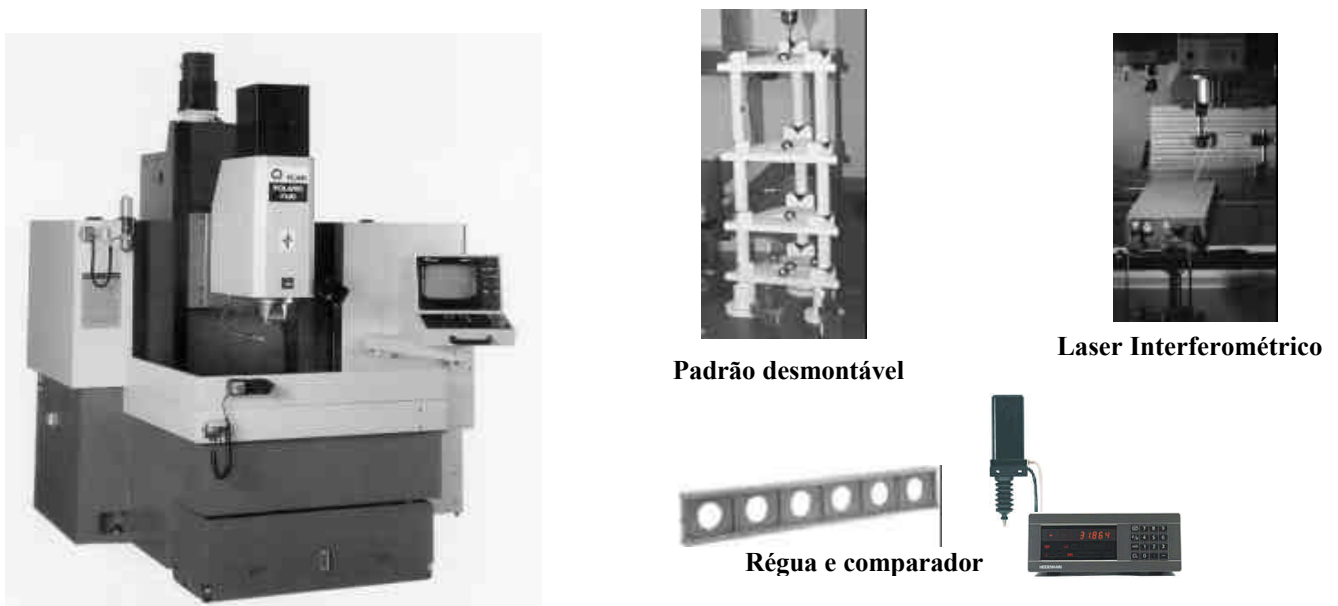
**Figura 5. Adaptação de apalpador para medir padrão (placa de furos) longe do eixo Z**

No caso do padrão desmontável, o ensaio é realizado na mesma linha de deslocamento do eixo Z e, para esse ensaio, o padrão vertical se adequou plenamente, tanto pela praticidade, como pela adequação entre a incerteza do padrão e os requisitos de precisão impostos pelo centro de usinagem. Para verificar na prática essas vantagens, uma mesma máquina-ferramenta, um centro de

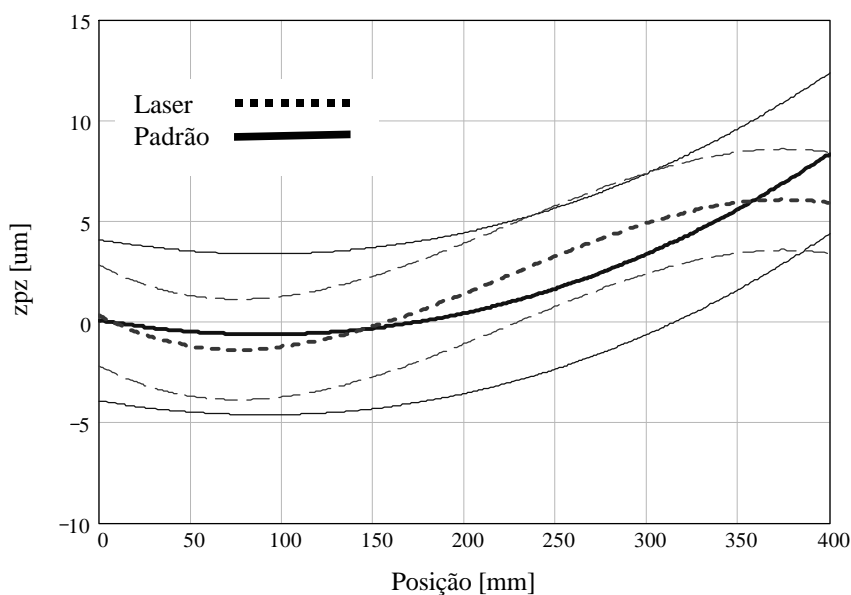
usinagem vertical, foi testada nos planos verticais com métodos clássicos (laser, esquadro, régua, placa de furos), e com o padrão desmontável (figura 6).

Os resultados foram processados e comparados, bem como os tempos dos ensaios e os custos dos equipamentos envolvidos em cada ensaio. Com isso, se pôde ter uma comparação realista entre a confiabilidade metrológica e características operacionais dos métodos e dos padrões propostos. As figuras 7, 8 e 9 mostram alguns dos resultados metrológicos (resultado e incerteza), comparando os métodos nos ensaios de posicionamento linear (laser x padrão desmontável) e retilidade (régua x padrão desmontável). As linhas finas indicam a incerteza dos resultados.

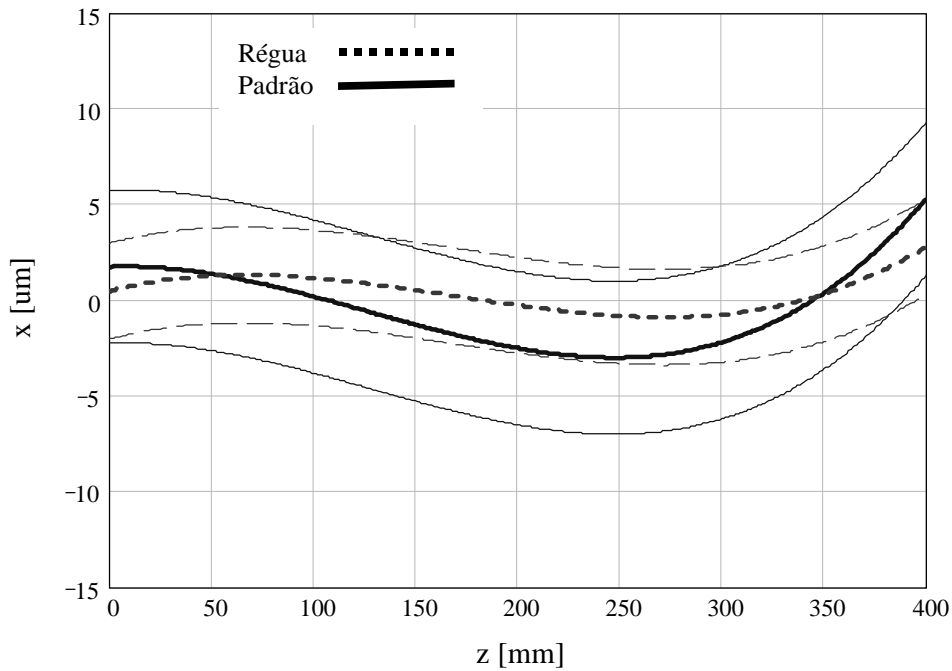
Em todos esses resultados, pode-se verificar uma proximidade bastante grande, indicando uma compatibilidade metrológica entre os diferentes métodos. Se a comparação for com o ensaio com uma placa de furos (posicionada longe do eixo Z da máquina) os resultados do padrão desmontável são ainda mais expressivos.



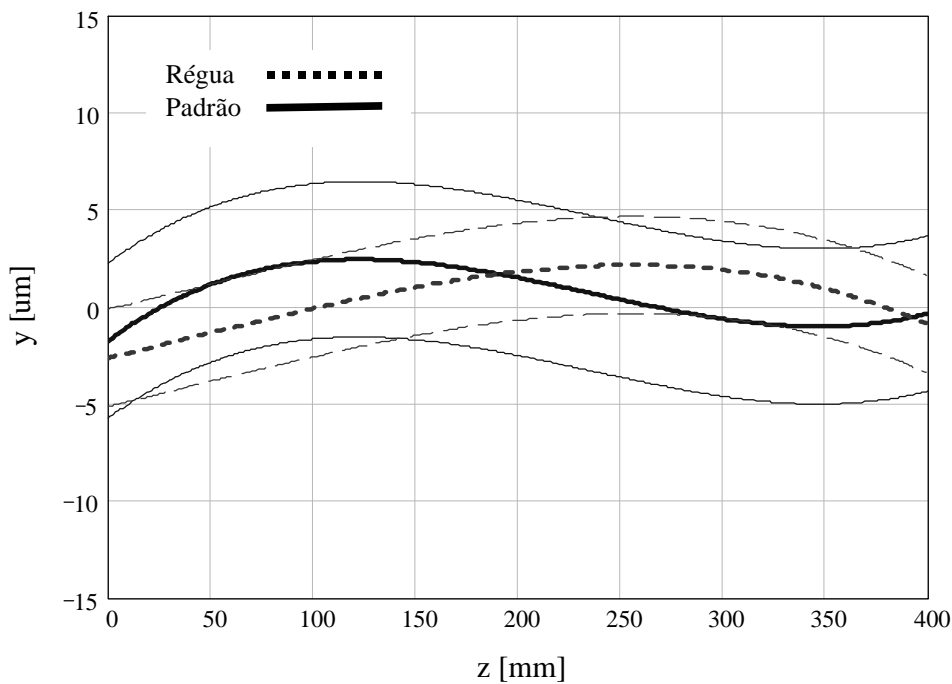
**Figura 6. Máquina-ferramenta ensaiada e técnicas de ensaio empregadas**



**Figura 7. Resultados dos ensaios de posicionamento linear – Eixo Z**

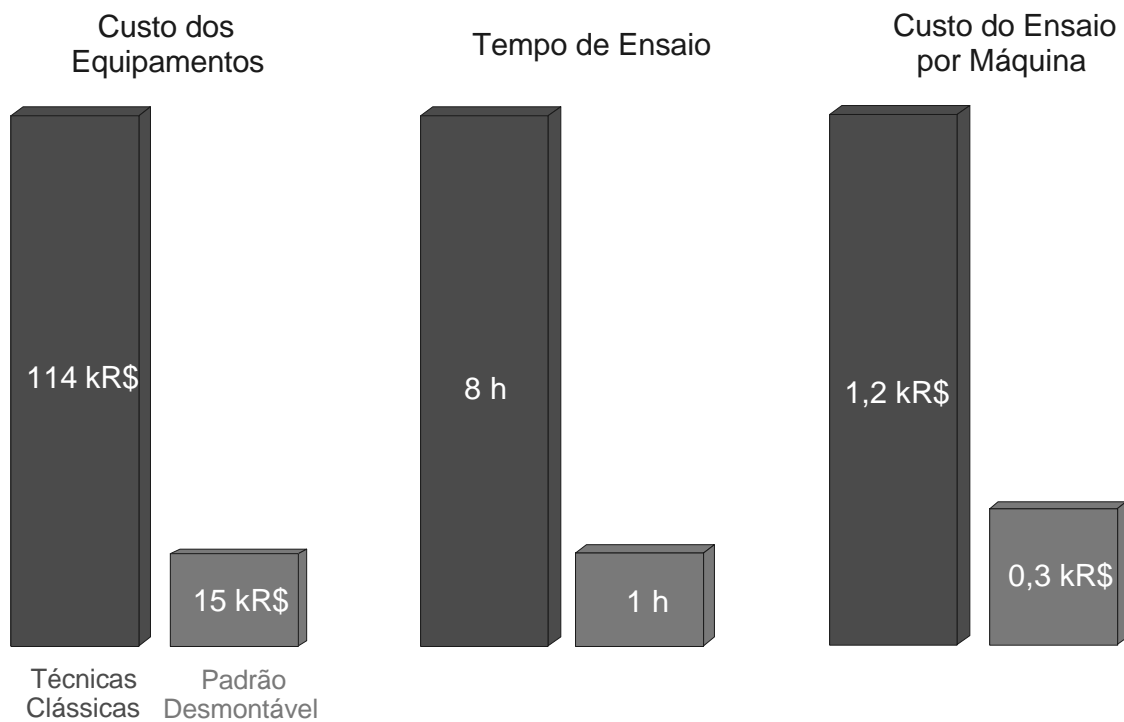


**Figura 8. Resultados dos ensaios de Retilidade do Eixo Z na direção X**



**Figura 9. Resultados dos ensaios de Retilidade do Eixo Z na direção Y**

Quando, agora, a comparação ocorre nos aspectos operacional e econômico, os números são bem diferentes. Os mesmos ensaios realizados com o laser, régua e esquadro, foram realizados, simultaneamente, com o padrão desmontável, em 1/10 do tempo e com 1/8 do custo dos equipamentos envolvidos. A figura 10 ilustra essa comparação. As vantagens operacionais aliada a uma confiabilidade metrológica semelhante a de métodos clássicos mostra o potencial de aplicabilidade de um padrão desmontável com montagem cinemática.



**Figura 10. Comparação operacional e econômica entre métodos de ensaio**

## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho explorou o princípio da montagem cinemática em um padrão dimensional para o ensaio de Máquinas de Medir por Coordenadas e de Máquinas-ferramenta equipadas com apalpador de medição. O trabalho foi desenvolvido dentro de uma tese de Doutorado e continua sendo otimizado para melhorar a sua confiabilidade metrológica e para torná-lo capaz de verificar todos os eixos de uma máquina multi-eixos.

Os resultados metrológicos e operacionais encontrados já indicam que existem boas possibilidades de explorar esse princípio para a construção de padrões dimensionais flexíveis e de boa exatidão, para muitas aplicações industriais. O padrão apresentou uma incerteza  $U_{95}$  de  $\pm 2,2 \mu\text{m}$  na posição dos centros das esferas, podendo ser ainda mais reduzida pelo emprego de certas estratégias de medição durante a sua calibração.

Em função do pouco tempo de uso do padrão desmontável, a estabilidade de longo prazo não pôde ser avaliada, e é um fator bastante importante para a boa aplicabilidade do padrão. Certamente irão contribuir para isso um adequado alívio de tensões no material do padrão, e uma elevada dureza e resistência ao desgaste dos elementos de contato na montagem cinemática.

Atualmente, há uma grande necessidade no desenvolvimento de padrões e métodos de ensaio para torna-los não só mais confiáveis metrologicamente, mas também para torná-los mais práticos de utilização e de custo atrativo. Essas qualidades metrológica, operacional e econômica são fundamentais para motivar os usuários de máquinas a praticarem ensaios periódicos em seus equipamentos, com reflexos direto na qualidade de seus produtos (Krulwich, 1998).



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Pfeifer, T. Fertigungsmesstechnik. Oldenburg, 1998.

Newport Inc., *Introduction to Positioning Equipment*. Technical Report, 1997.

Sousa, A.; Schneider, C. A. *An indirect method to verify and enhance machine tool accuracy*. Proceeding of LAMDAMAP IV, Laser Metrology and Machine Performance, July 1999.

Trapet, E.; Wäldele, F. *A reference object based method to determine the parametric error components of coordinate measuring machines* Measurement, Vol. 9, No 1, pp. 17 - 21, 1991.

Sousa, A. *Calibrated artifacts with Coordinate Metrology innovating the Geometric tests of machining Centers*. Doctor Thesis, Federal University of Santa Catarina - Brazil, 2000.

Sousa, A.; Schneider, C. A. *A comparison between laser interferometric and calibrated artifacts for the geometric test of machine tools*. Proceedings of the International Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement in Industry, October 1999.

Krulwich, D. *Rapid mapping of volumetric machine errors using distance measurements*. Proceedings of the International Seminar on Improving machine tool performance, vol. 2, p. 487, 1998.

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações contidas nesse trabalho.

**TITLE:** A DETACHABLE STEP GAUGE TO THE GEOMETRIC TEST OF COORDINATE MEASURING MACHINES AND MACHINING CENTERS

**First Author's Name:** André Roberto de Sousa

**Second Author's Name:** Carlos Alberto Schneider

### Abstract

The use of classic standards to verify the accuracy of Coordinate Measuring Machines and Vertical Machining Centers imposes some difficulties when testing vertical axis of such equipments, because of the need of measuring parallel to the path of the machine axis. In this paper, a detachable step gage has been designed and tested to overcome this problem, particularly critical for testing purpose in Machining Centers. Using the principle of kinematics mounting, the detachable artifact can be measured along the vertical path of the machine, assuring the Abbe principle and improving the metrological reliability of the test. The experimental results have shown a good dimensional stability of this artefact and repeatability of the positioning and the repositioning during the calibration. Comparisons with classic methods (laser interferometer, square and straightedge) applied to a same machine tool have shown similar results with operational and economic advantages.

**Keywords:** Metrology, Geometric Tests, Coordinate Measuring Machine