

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE MEDIÇÃO DESENVOLVIDAS PARA PLACA DE PADRÕES

Alessandro Marques

Bruno Daniel Hack

Dalberto Dias da Costa

Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Paraná

amarques@ufpr.br, brunodanielhack@gmail.com, dalberto@ufpr.br

Resumo. O trabalho aqui desenvolvido se baseia em experimentos para eleger a melhor estratégia, entre diferentes alternativas, para a medição de entidades geométricas posicionadas em uma placa de padrões projetada para aplicações em máquinas de medição por coordenadas (MMCs). A partir do levantamento das incertezas associadas, foi possível indicar semelhança nos resultados de medição, onde a vantagem obtida pelas estratégias desenvolvidas e executadas neste trabalho aparece no tempo de execução, uma vez que a estratégia pré-determinada foi projetada para funcionar em MMCs de tecnologia distinta da utilizada neste experimento. A utilização de estratégias diferentes também permitiu a detecção de uma anomalia do sistema de medição, ao comparar as diferenças dos erros mais significativos e a quais componentes da placa eles estavam associados.

Palavras-chave: máquinas de medição por coordenadas; resultado da medição; estratégia de medição.

1. INTRODUÇÃO

As estratégias de medição focadas em MMCs buscam melhorar a estimativa de superfícies complexas, reais e imperfeitas, melhorando a amostragem de uma região e aplicando algoritmos de ajuste. Estas operações utilizam-se de métodos estatísticos de regressão que resultam na melhor aproximação possível da geometria substituta. ORREGO et al. (2000) menciona que amostragens acima de 50 pontos, para entidades geométricas padrão como cilindros, esferas, planos, podem ser bastante satisfatórias em determinar erros de forma, enquanto que WECKENMANN et al. (1995) afirmaram que há uma estabilização das curvas dos algoritmos de ajuste conforme aumenta o número de pontos amostrados.

Como exemplo, FLACK (2001) relata procedimentos recomendáveis a operadores das MMC, descrevendo formas de determinar tanto o número quanto a distribuição de pontos amostrados, contemplando a abordagem de fatores como exatidão e economia (tempo de medição). Uma dessas formas envolve a aplicação de estratégias pré-definidas em norma (*ad hoc*), através da padronização de técnicas em laboratórios nacionais. Este modo é apresentado na Tab. 1, sendo baseado na norma britânica BS 7172 (1989), além de equações que consideram diversas dimensões das entidades para ajustar a distribuição dos pontos sobre a superfície. A principal deficiência deste método está em considerar desvios da dimensão nominal que são introduzidos na fabricação, diferentemente de abordagens científicas, mais avançadas.

Tabela 1 - Número recomendado de pontos para algumas geometrias padronizadas (BS 7172:1989, adaptado).

Geometria	Mínimo	Mínimo recomendado	
Plano	3	9	3 linhas de 3 pontos cada
Círculo	3	7	Detecta até 6 lóbulos
Esfera	4	9	3 círculos de 3 pontos cada em 3 planos paralelos
Cone	6	12	Círculos em quatro planos paralelos para obtenção de erro de retitude
		15	Cinco pontos em cada círculo para levantamento de circularidade
Cilindro	5	12	Círculos em quatro planos paralelos para obtenção de erro de retitude
		15	Cinco pontos em cada círculo para levantamento de circularidade

1.1. Objetivos

Fazer a comparação dos erros absolutos levantados pela aplicação de cada estratégia de medição. Sendo assim, se faz necessário a reprodução de todas as estratégias propostas, dentro do ambiente do experimento, de forma a gerar as amostras para poder analisá-las numa tabela de balanço de incertezas, e assim averiguar quais foram os resultados mais

próximos dos valores de referência fornecidos para a placa de padrões, desenvolvida para a tese de BARROS (2012), classificando de fato as melhores e as piores estratégias para a situação levantada.

2. METODOLOGIA

O LAMED – Laboratório de Metrologia Dimensional do INMETRO – desenvolveu a placa de padrões, conforme figura 1, destinada ao teste de MMCs a partir de aplicação de diferentes estratégias de medição desenvolvidas (BARROS, 2012). Para tanto, foi desenvolvida uma primeira estratégia, recomendada para aplicação na MMC a ser verificada, e que foi utilizada neste trabalho. As demais estratégias envolvidas estão brevemente descritas na seção 2.2.

Tabela 2 - Dimensões GDT da placa de padrões (BARROS, 2012).

Característica	Símbolo	Objeto	Elemento(s)
Dimensão		Blocos-Padrão	Comprimento (s)
		Esferas	Diâmetros E, F, G Distâncias EF, EG, FG
		Anéis	Diâmetros A, B Distância AB
		Pinos	Diâmetros C, D Distância CD
		Cone	Diâmetros
Ângulo		Cone	Ângulo do Cone H
Retitude		Cone	Geratrizes: L0 e L90
Circularidade		Esferas, Anéis, Pinos	Circunferência central
Cilindricidade		Pinos	Cilindros
Coaxialidade		Cone	Cone Base do cone
Perpendicularidade		Pino / Placa	Cilindro, Plano de referência

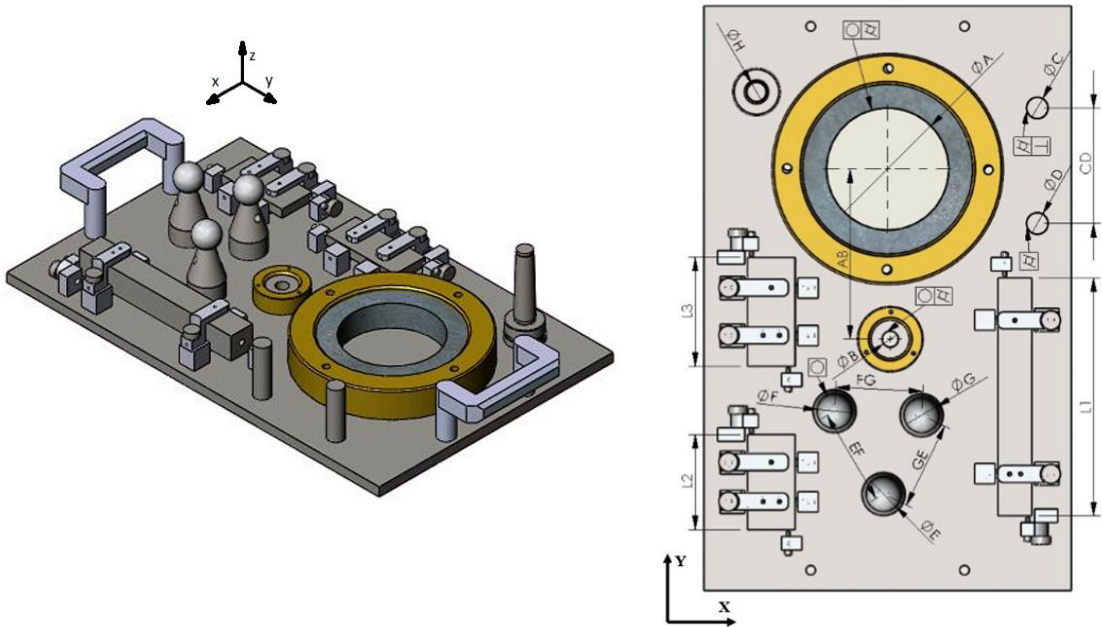


Figura 1 - Projeto da placa de padrões e sistema de coordenadas (BARROS, 2012). Cotas para medição.

Foram realizadas 3 medições de cada cota (dimensão, tolerância geométrica ou distância) apresentada na Tab. 2, repetindo sempre o mesmo procedimento, como sugerido por Barros em 2012. Os valores das medições foram registrados com 5 casas decimais. Após a aquisição de todos os dados, foi alimentada uma planilha eletrônica para comparação dos resultados de medição obtidos pelas diferentes estratégias, onde foram fornecidos pelo LAMED os valores de referência para cada elemento.

2.1. Preparação do mensurando e do sistema de medição

A MMC do LABMETRO é um modelo pórtico da fabricante HEXAGON, modelo Sheffield D8 ano 2006, com comando numérico e software PC-DMIS® CAD ++ versão 4.1. Foi submetida para calibração pela última vez em 2008, o que configura a hipótese de deriva temporal no balanço de incertezas. Seu apalpador é modelo tesa star, tipo touch trigger, em montagem com haste de simples contato. As condições ambientais registradas no dia em que foram efetuadas as medições eram de 20,5°C ±1°C e umidade relativa 69% ±1%, condições adequadas aos trabalhos de laboratório.

2.2. Estratégias

I - Após a preparação da máquina e do mensurando, todas as rotinas foram programadas utilizando o modo de medição automática do PC-DMIS®, seguindo a sequência de instrução disponível em BARROS (2012, Anexo C). Nesta estratégia, as medições dimensionais e de erros de forma são realizadas em etapas separadas. As operações são sequenciadas de forma a obter, respectivamente, dimensões do elemento, erros de forma e distâncias, sendo estas últimas entidades simplesmente calculadas em função das amostragens.

II.A - A preparação desta estratégia utiliza a norma BS 7172 (1989), abordada anteriormente. Diferentemente da estratégia **I**, a obtenção dos erros de forma será dada diretamente pela medição dimensional, uma vez que a distribuição destes pontos abrange regiões consideráveis do mensurando, porém, a ordem de execução das operações permanece a mesma.

II.B - Esta estratégia é semelhante à **II.A**, com a ressalva de que a ordem de medição de alguns elementos foi invertida propositalmente. Por exemplo, na medição da distância CD, media-se primeiro o pino C e em seguida o D, sendo essa operação, portanto, invertida. Para obter a distância L1, o plano foi ajustado na superfície oposta, diferentemente das estratégias **I** e **II.A**.

2.3. Cálculo do erro absoluto

Caracteriza-se pela diferença, em módulo, do resultado de medição (V_{lab}) em comparação com uma referência (V_{ref}), ou um valor convencional. Para tal análise, utiliza-se a equação (1):

$$E = |V_{lab} - V_{ref}| \quad (1)$$

O valor de referência (V_{ref}) foi dado por Barros em 2012 como a média das medições, quando utilizada a Máquina de Medir de ultra precisão Legex 9106.

3. RESULTADOS, INTERPRETAÇÃO, DISCUSSÃO.

Na Tab. 3 apresentam-se, para as cotas demonstradas na Fig. 1 e apresentadas na Tab. 2, os resultados dos erros absolutos calculados e também dos valores de desvio padrão (DP), para todas as estratégias.

Conforme o guia para expressão da incerteza de medição (2008), assume-se distribuição normal com dois graus de liberdade para a fonte de incerteza das 3 medições, e distribuição normal com graus de liberdade infinitos para a fonte originária do certificado de calibração, que é um valor fixo e aplicável para todos os itens, adotando o fator de abrangência, $k=2$, ou seja, nível de confiança de aproximadamente 95,45%. A grande maioria das medições efetuadas, principalmente das distâncias, que possuem os maiores cotas, foi posicionada alinhada ao eixo Y, que foi constatado por MILHORETTO (2017) como o melhor eixo da máquina para realizar medições, onde, de acordo com o certificado de calibração da MMC, as dimensões obtidas estão dentro da faixa de erros aceitáveis. A definição de erros aceitáveis foi pronunciada conforme o certificado de calibração e também considerando a análise realizada por MILHORETTO (2017), onde as medições obtidas no eixo Y estão dentro da equação $E=A+L/K$, de acordo norma ISO 10360-2.

Valores iguais a 'NA' indicam que a referência não foi disponibilizada, e dessa forma a análise não foi realizada. Os comportamentos de desvio padrão (DP) obtidos a partir das três medições e também dos valores de erro absoluto se repetem para todas as estratégias. Na grande maioria dos itens amostrados, como o valor de DP fica abaixo da resolução de 1 µm, pode-se dizer que a máquina possui boa repetibilidade. Embora a estratégia tenha alterado, o comportamento dos erros apresentou-se semelhante, com destaque especial para as medições L1, L2 e L3, na estratégia **II.B**, reduzidos em mais de 50%. Sendo assim, a estratégia **II.B** demonstrou melhor desempenho nas medições dos blocos padrão.

Os maiores destaques desta análise estão relacionados às distâncias, que também são as maiores cotas, onde é evidente a diferença entre os valores medidos e os valores de referência. No caso dos blocos padrão (cotas L1, L2 e L3) os erros oscilam numa faixa de 1 µm até 20 µm, dependendo da estratégia. Como se trata do mesmo elemento da peça, um bloco rígido, isso pode denunciar problemas no apalpador da máquina, já que estas cotas são obtidas pela amostragem de planos medidos de forma unilateral pelo conjunto. O que não é verdade se for considerada as distâncias entre componentes (cotas AB, CD, EF, EG, FG), onde os elementos associados às cotas são amostrados por movimentação multilateral do dispositivo, e isso indica uma possível mudança nas posições onde estavam montados,

causada por deformação do conjunto ou mesmo algum choque mecânico. Este comportamento predomina em todas as estratégias.

Tabela 3 - Erros absolutos.

ESTRATÉGIA I			ESTRATÉGIA IIa			ESTRATÉGIA IIb		
Descrição	DP (mm)	E (mm)	Descrição	DP (mm)	E (mm)	Descrição	DP (mm)	E (mm)
Diâmetro E	0,00032	0,00114	Diâmetro E	0,00050	0,00100	Diâmetro E	0,00041	0,00019
Diâmetro F	0,00075	0,00486	Diâmetro F	0,00027	0,00379	Diâmetro G	0,00035	0,00648
Circularidade F	0,00082	0,00987	Circularidade F	0,00067	0,00541	Diâmetro F	0,00033	0,00431
Diâmetro G	0,00095	0,00537	Diâmetro G	0,00009	0,00656	Circularidade F	0,00028	0,00561
Distância EF	0,00022	0,67118	Distância EF	0,00047	0,67069	Distância EF	0,00018	0,67067
Distância EG	0,00019	0,09972	Distância EG	0,00032	0,09855	Distância EG	0,00017	0,09895
Distância FG	0,00093	0,36769	Distância FG	0,00010	0,36687	Distância FG	0,00021	0,36676
Diâmetro B	0,00019	0,00808	Diâmetro B	0,00020	0,00919	Diâmetro A	0,00174	0,00303
Circularidade B	0,00100	0,00284	Circularidade B	0,00029	0,00592	Circularidade A	0,00211	0,00245
Cilindricidade B	0,00132	0,00861	Cilindricidade B	0,00051	0,01331	Cilindricidade A	0,00234	0,15265
Diâmetro A	0,00022	0,00346	Diâmetro A	0,00037	0,00312	Diâmetro B	0,00016	0,00940
Circularidade A	0,00094	0,00221	Circularidade A	0,00049	0,00107	Circularidade B	0,00068	0,00687
Cilindricidade A	0,00036	0,00753	Cilindricidade A	0,00123	0,15249	Cilindricidade B	0,00074	0,01338
Distância AB	0,00058	0,05157	Distância AB	0,00038	0,02916	Distância AB	0,00053	0,02797
Diâm. C em Z = 45	0,00061	0,00715	Diâm. C em Z = 45	0,00031	0,01044	Diâm. D em Z = 45	0,00033	0,00766
Diâm. C em Z = 55	0,00048	0,00785	Diâm. C em Z = 55	0,00042	0,00676	Diâm. D em Z = 55	0,00071	0,00602
Diâm. C em Z = 65	0,00068	0,00848	Diâm. C em Z = 65	0,00021	0,00779	Diâm. D em Z = 65	0,00041	0,00501
Cilindricidade C	0,00037	0,01684	Cilindricidade C	0,00010	0,00606	Cilindricidade D	0,00012	0,00624
<i>Perpendic. C</i>	<i>0,00042</i>	<i>NA</i>	<i>Perpendic. C</i>	<i>0,00012</i>	<i>NA</i>	Diâm. C em Z = 45	0,00017	0,00931
Diâm. D em Z = 45	0,00143	0,00701	Diâm. D em Z = 45	0,00088	0,00681	Diâm. C em Z = 55	0,00086	0,00633
Diâm. D em Z = 55	0,00096	0,00747	Diâm. D em Z = 55	0,00036	0,00584	Diâm. C em Z = 65	0,00058	0,00725
Diâm. D em Z = 65	0,00087	0,00733	Diâm. D em Z = 65	0,00063	0,00445	Cilindricidade C	0,00012	0,00595
Cilindricidade D	0,00179	0,00248	Cilindricidade D	0,00027	0,00586	<i>Perpendic. C</i>	<i>0,00015</i>	<i>NA</i>
Distância CD	0,00053	0,35954	Distância CD	0,00071	0,32762	Distância CD	0,00016	0,32730
Distância L1	0,00121	0,01234	Distância L1	0,00049	0,00961	Distância L1	0,00101	0,04897
Distância L2	0,00135	0,20805	Distância L2	0,00043	0,20459	Distância L3	0,00060	0,05612
Distância L3	0,00222	0,15866	Distância L3	0,00040	0,15769	Distância L2	0,00071	0,05293
Ângulo em H	0,00137	0,02367	Ângulo em H	0,00131	0,02917	Ângulo em H	0,00106	0,03032
Diâm. H em Z = 55	0,00781	0,00482	Diâm. H em Z = 55	0,00740	0,00027	Diâm. H em Z = 55	0,00601	0,00075
Diâm. H em Z = 85	0,00709	0,01259	Diâm. H em Z = 85	0,00672	0,01388	Diâm. H em Z = 85	0,00545	0,01401
<i>Retitude H Plano X</i>	<i>0,00444</i>	<i>NA</i>	<i>Retitude H Plano X</i>	<i>0,00500</i>	<i>NA</i>	<i>Retitude H Plano X</i>	<i>0,00608</i>	<i>NA</i>
<i>Retitude H Plano Y</i>	<i>0,00788</i>	<i>NA</i>	<i>Retitude H Plano Y</i>	<i>0,00089</i>	<i>NA</i>	<i>Retitude H Plano Y</i>	<i>0,00197</i>	<i>NA</i>
Coaxialidade H	0,08694	0,08417	Coaxialidade H	0,17583	0,19307	Coaxialidade H	0,20853	0,18265

3.1. Tempo de medição

A melhor estratégia desempenhada neste caso foi a **II.A**, isto ocorre devido a mudança dos algoritmos, onde foram utilizados predominantemente elementos automáticos, assim como na estratégia **II.B**, e diferente da estratégia **I**, que seguiu um rigor maior em relação a referência. Avaliando a exatidão das dimensões, ficou demonstrado que a variação foi insignificante, tanto para **II.A** como para **II.B** em relação a **I**.

Tabela 4 - Tempos de medição.

TEMPOS DE MEDIÇÃO		
	Loop médio	Total
Estratégia I	26 min	78 min
Estratégia II.A	12 min 40 s	38 min
Estratégia II.B	16 min 40 s	50 min

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÃO

Cabe destacar que, em termos de exatidão, a estratégia **II.B** foi a que apresentou, em média, os resultados mais próximos dos valores de referência, vista a magnitude dos erros encontrados. Nota-se por exemplo melhor desempenho na obtenção das distâncias entre centros dos furos A e B pela estratégia **I**, ou a medição de comprimento dos blocos-padrão pela estratégia **II.B**. E a estratégia **II.A**, embora tenha sido a mais rápida, foi a de pior desempenho no quesito envolvendo diferenças entre as cotas medidas pelas cotas de referência. No aspecto geral, as amostragens obtidas pelas estratégias próprias envolvem menos pontos e são suficientes para representar as cotas solicitadas, enquanto que a estratégia **I** é mais dispendiosa nesse sentido.

Tabela 5 - Desempenho entre estratégias.

REQUISITO	MELHOR DESEMPENHO	PIOR DESEMPENHO
Erro absoluto	Estratégia II.B	Estratégia II.A
Tempo de medição	Estratégia II.A	Estratégia I

Embora tenha sido possível eleger uma estratégia vencedora, outro resultado relevante da análise cai sobre os grandes valores dos erros obtidos na amostragem das distâncias. De certa forma, as distâncias entre geometrias ajustadas (cotas L1, L2, L3, AB, CD, EF, EG, FG) apresentaram os valores mais elevados de erro absoluto para todas as estratégias. Essas cotas são calculadas pelo programa, onde seus valores são função dos dois elementos amostrados envolvidos e dos ajustes obtidos para cada geometria substituta, diferente das cotas das geometrias substitutas, que são função de apenas uma amostragem. E como foi possível perceber, a utilização de diferentes estratégias de medição permitiu ao usuário detectar uma anomalia da máquina que não havia aparecido de outra forma, conforme relatado no item 3.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, Wellington Santos. *Estudo Sobre a Confiabilidade Metrológica das Máquinas de Medição por Coordenadas na Utilização de Varredura por Contato*. Orientador: Max Suell Dutra Tese (doutorado) – Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Mecânica, 2012.

BS 7172: 1989, *Guide to assessment of position, size and departure from nominal of geometric features*.

FLACK, D. 2001, *Measurement Good Practice Guide No. 41—CMM Measurement Strategies*, NPL, ISSN.1368-6550. London, UK: National Physical Laboratory.

ISO GUM 2008, *Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição*. Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012, 141 p. Inclui índice. Traduzido de: Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement – GUM 2008. 2008. ISBN: 978-85-86920-13-4

MILHORETTO, Eduardo Toso. *Avaliação de desempenho de uma máquina de medir por coordenadas através de artefato padrão*. Orientador: Prof. Dr. Alessandro Marques. Trabalho de conclusão de Curso. UFPR, DE MEC, Curitiba, 2017.

ORREGO, R.M.M. GIACOMO, B. ABACKERLI, A.J. *Fontes de Erros em Metrologia a Três Coordenadas: Considerações Gerais*. Revista de Ciência e Tecnologia, Vol. 8, No 16, pp 43-56, 2000.

WECKENMANN, A., EITZERT, H., GARMER, M., WEBER, H. *Functionality-oriented evaluation and sampling strategy in coordinate metrology*. Precision Engineering, Volume 17, Issue 4, 1995, Pages 244-252, ISSN 0141-6359.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

PERFORMANCE ANALYSIS OF DIFFERENT MEASUREMENT STRATEGIES DEVELOPED FOR A STANDARDS TEST DEVICE

Mechanical Engineering Department - Federal University of Paraná

Abstract. This work is based on experiments to choose, among different alternatives, the best strategy for the measurement of geometric entities placed on a standards test device designed for applications in coordinate measuring machines (CMMs). After surveying the associated uncertainties, it was possible to indicate similarity in the measurement results, where the advantage obtained by the strategies developed and executed in this work appears in the execution time, since the predetermined strategy was designed to work in different technology CMMs used in this experiment. It was also possible to detect an anomaly of the measurement system by comparing the most significant errors and to which device components they were associated.

Keywords: coordinate measuring machines; measurement results; measurement strategies.

RESPONSABILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.