



AValiação Dinâmica de Sondas de Gatilhamento em Máquinas de Medir por Coordenadas.

*Ângela M. N. dos Santos*¹, *Antonio Piratelli-Filho*², *Alberto C. G. C. Diniz*³

¹ Instituto Federal de Roraima, Boa Vista, Brasil, angela@ifrr.edu.br

² Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia - Depto. Engenharia Mecânica, Brasília, Brasil, pirateli@unb.br

³ Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia - Depto. Engenharia Mecânica, Brasília, Brasil, adiniz@unb.br

Resumo: As características dinâmicas de processos de medição estão sendo gradativamente mais exigidas, na medida em que os processos de produção automatizados proporcionam a redução do tempo gasto na fabricação de peças. As técnicas de medição por coordenadas estão se tornando imprescindíveis no controle dimensional de peças complexas, para a garantia da qualidade e confiabilidade metrológica exigidas atualmente nos processos industriais, uma vez que associam flexibilidade e redução do tempo de medição e da incerteza das medidas efetuadas. Estas máquinas geralmente usam sondas de gatilhamento para capturar as coordenadas de pontos na superfície das peças, sendo que a dinâmica do processo de medição influencia os erros e o tempo total de operação. Este trabalho apresenta os princípios de funcionamento das Máquinas de Medir por Coordenadas (MMCs) e um estudo das fontes de erros dinâmicos em sondas de gatilhamento dessas máquinas. As principais variáveis envolvidas na medição dinâmica com estas sondas foram investigadas através de técnicas de planejamento de experimentos e a análise da variância possibilitou determinar as que mais contribuíram para os erros na medição.

Palavras chave: erros dinâmicos, sondas de gatilhamento, medição por coordenadas.

1. INTRODUÇÃO

No contexto industrial, as medições são fundamentais para garantir a qualidade e confiabilidade, no atendimento às exigências atuais de produtos e processos. As técnicas metrológicas envolvidas nos processos produtivos fornecem dados para tomada de decisões visando a melhoria da qualidade. Isto favorece o aumento da produtividade, a redução de custos, além de promover a competitividade no mercado globalizado.

Desta forma, as indústrias precisam acompanhar a evolução tecnológica e atender a crescente demanda por automação. Isto requer rapidez dos processos produtivos e requer resposta e atuação rápidas dos sistemas metrológicos, demandando novos métodos de medição e de calibração para correção da resposta de sensores e para avaliação da incerteza da medição. Surge assim a necessidade de se investigar cada vez mais as medições dinâmicas e a dinâmica das medições.

Esward, Elster e Hessling [1] definiram a medição dinâmica como sendo a medição de uma quantidade física que varia com o tempo e cuja variação afeta consideravelmente o resultado e a incerteza associada. Os autores apresentaram uma revisão sobre os desenvolvimentos nesta área e enfatizaram a determinação da incerteza nas medições destas grandezas. Dentro do conceito de metrologia dinâmica, pode-se inserir a calibração dinâmica de sensores e a análise de sistemas complexos de medição [1]. Clark [2] afirmou que uma medição é dinâmica quando a componente variável de uma grandeza física apresenta constante de tempo menor que um segundo, ou seja, variações relativas superiores a 63% em menos de um segundo [2].

Alguns setores industriais como da construção naval, aeronáutica, metal-mecânica e principalmente a indústria automobilística, tem explicitado a urgência por processos automatizados e assim mais velozes, como forma de aumentar a produtividade. Isto tem levado ao emprego de sistemas de medição automatizados como forma de acelerar o processo de inspeção. Nestas indústrias, o uso de Máquinas de Medir por Coordenadas (MMCs) tem encontrado grande aceitação, sendo que a medição com contato usando sondas de gatilhamento tem sido bastante utilizada.

As Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) são utilizadas tanto para inspeção em processos de produção como para medições de apoio à pesquisa e calibração de artefatos e padrões [3]. Sua principal característica consiste na capacidade de medir uma variedade de formas geométricas de modo flexível e com relativa automatização. A determinação dos elementos geométricos é feita a partir de pontos capturados por uma sonda que pode ser com ou sem contato com a peça. As sondas mais comuns são as sondas de gatilhamento, onde o contato de uma esfera padrão calibrada com a superfície sob medição dispara um sinal elétrico para o software de controle da MMC capturar as coordenadas x , y e z das escalas da máquina.

As Máquinas de Medir por Coordenadas (MMCs) possibilitam a medição da forma real de um objeto e a comparação com a forma nominal, visando a avaliação de informações como dimensões, geometria, localização e orientação especificadas no projeto da peça. Para isso, é necessário realizar a apalpação de pontos nas superfícies da

peça física, cujas coordenadas são definidas segundo escalas acopladas ao instrumento. Os pontos com coordenadas X, Y e Z são tratados através de software dedicado para determinação da geometria e dimensões das peças.

A estrutura mais comum das MMCs é do tipo Ponte Móvel, formada por três eixos perpendiculares entre si, em forma de ponte. A presença de escalas lineares em cada eixo serve para determinar a localização espacial da ponta de um sistema de apalpação, constituindo um sistema de coordenadas cartesiano. Eixos com mancais aerostáticos são usados para deslizamento da estrutura da ponte móvel (eixo Y), sobre o qual desliza outro corpo na direção horizontal e perpendicular a este primeiro (eixo X). Um terceiro corpo tem movimento vertical, numa direção perpendicular aos eixos X e Y (eixo Z). Um sistema de apalpação é acoplado à extremidade do eixo Z, na parte inferior, consistindo de uma sonda e apalpador (dispositivo mecânico, eletrônico ou óptico), para localizar a posição (X,Y,Z) de um ponto.

Outros tipos construtivos de MMCs são as que apresentam estrutura em forma de ponte fixa (Gantry), Cantilever e Braço articulado. As MMC's podem ainda ser utilizadas para executar medições contínuas, através de um processo de escaneamento. Nesse caso, o uso no modo *scanning* implica na manutenção do apalpador em contato com a superfície da peça durante o deslocamento ao longo de uma trajetória predefinida. O processo de escaneamento pode ser realizado com o uso de sondas sem contato, como aquelas baseadas em emissão de feixe laser.

Na medição com sondas de gatilhamento, o contato da esfera com a superfície da peça é feito com a sonda em movimento e as características dinâmicas da medição influenciam os erros na determinação dos pontos. Pesquisas tem sido realizadas para investigar as variáveis dinâmicas de MMCs e de sondas de gatilhamento, visando conhecer seu efeito nos erros e na incerteza de medição e avaliar a possibilidade de executar as medições usando maiores velocidades de operação.

Alguns autores apresentaram um estudo envolvendo o uso de técnicas de planejamento de experimentos para investigar os erros e incerteza das medições de MMCs com sondas de gatilhamento [4]. A dinâmica de funcionamento das MMCs tem sido investigada e a determinação dos erros dinâmicos e da incerteza de medição tem sido estudada [5, 6]. Uma publicação recente mostra o resultado da análise do desempenho dinâmico dessas máquinas, considerando seis variáveis do processo de sondagem: velocidade de aproximação do apalpador, força da mola (pré-carga), comprimento da agulha do apalpador, orientação do apalpador da sonda e número de pontos determinados [7]. Os autores observaram que a variável velocidade de aproximação foi a que mais influenciou nos resultados da medição de uma esfera [7].

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo das variáveis envolvidas no processo de medição dinâmica usando uma MMC com sonda de gatilhamento. A ferramenta estatística de planejamento de experimentos e análise de variância foi utilizada para execução dos experimentos e para a análise dos resultados das medições.

2. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Os experimentos de medição foram realizados em uma Máquina de Medição por Coordenadas, modelo Cantilever QM-353, fabricada pela Mitutoyo Sulamericana Ltda e disponível no Laboratório de Metrologia da Universidade de Brasília (LM-UnB). Esta máquina está mostrada na figura 1, com seus principais elementos construtivos.

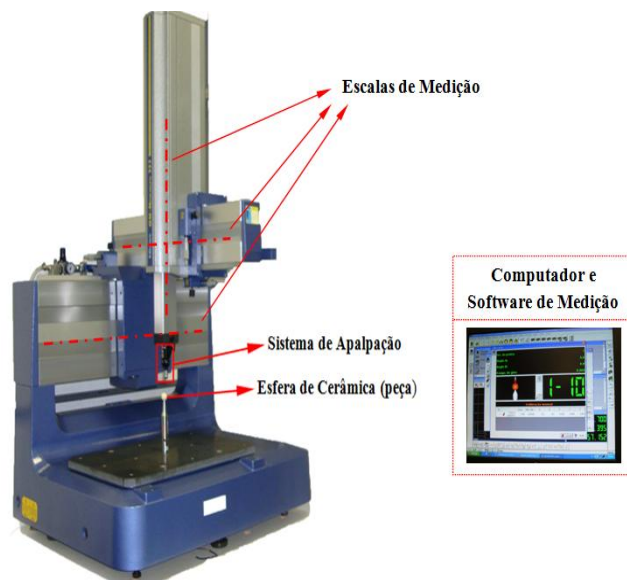


Fig. 1. MMC QM-353 da Mitutoyo usada no LM-UnB e os Elementos Básicos da sua Construção

Essa máquina apresenta um volume de trabalho de 300 x 400 x 300 mm e uma resolução das escalas de 0,001 mm em cada eixo de coordenadas. A incerteza de medição declarada em certificado de calibração é de $(1,2 + L/600)$ mm, onde L é o comprimento medido em mm. Uma sonda de gatilhamento fabricada pela Renishaw, modelo MH20, foi usada acoplada à MMC como sistema de apalpação. Durante as medições, a temperatura foi mantida em 20 ± 1 °C.

Uma esfera de cerâmica de diâmetro calibrado igual a 19,9834 mm e com incerteza padrão $\pm 0,3\mu\text{m}$ foi utilizada para executar as medições. O diâmetro foi determinado e os erros de medição foram calculados pela diferença entre valor medido menos o valor calibrado.

2.1 Sistema de Apalpação

Uma das principais partes de uma MMC é o sistema de apalpação, constituído pela sonda e pelo apalpador, responsável pela coleta de dados das coordenadas de pontos durante o processo de medição. A figura 2 mostra o sistema de apalpação da MMC do LM-UnB usada neste trabalho. Esta sonda é do tipo gatilhamento (*touch trigger probe*), com características de ser uma sonda de contato sensível ao toque. O contato da extremidade do apalpador (geralmente esférico) com a superfície da peça permite ao software da MMC capturar as coordenadas do ponto tocado, através de emissão de sinal elétrico pela sonda.



Fig. 2. Sistema de Apalpação da MMC do LM-UnB. [10 -11]

A configuração mais comum destas sondas usa chaves de contato ou cristais piezoelétricos, que são acionados no momento em que a esfera da haste entra em contato com a superfície, enviando um sinal para o controle da MMC que captura as coordenadas do ponto. No entanto é necessário um torque para o envio do sinal e isto causa um deslocamento da haste do sistema de apalpação, em relação ao verdadeiro ponto de contato que corresponde ao ponto da superfície da peça. O software de medição ajusta automaticamente as leituras para compensar o diâmetro da ponta do apalpador da sonda, porém este deslocamento indesejável que ocorre no contato somente pode ser compensado se os erros associados forem conhecidos.

Antes do início das medições, foi definida a qualificação do apalpador, através de um processo de calibração. Isto se faz necessário para que o software de medição conheça o diâmetro e a posição da ponta da sonda nas configurações que serão utilizadas no processo de medição. Para isso, realizou-se uma seqüência de dez pontos de medição na esfera de cerâmica de alta precisão com diâmetro calibrado e obtido o valor do diâmetro medido de 2,996mm. Deste modo, o software de medição armazena as informações da configuração calibrada e efetua as correções necessárias durante a utilização da sonda no processo de medição. Para a qualificação do apalpador, deve-se idealmente utilizar a mesma direção e velocidade de apalpação a ser utilizada na medição do objeto [12] e [13].

2.2 Experimento

Foi realizado um estudo preliminar para identificar as variáveis que influenciam os erros em MMCs com sondas de gatilhamento. Foi encontrado que os erros produzidos durante a medição estão associados à: velocidade de aproximação da sonda, aceleração da sonda, força de pré-carga da mola interna da sonda, orientação do apalpador da sonda, comprimento da haste do apalpador, posição da sonda no volume de trabalho da MMC (longitude e latitude), distância de aproximação durante a medição, número de pontos determinados durante a medição do elemento

geométrico da peça, características da peça medida como rigidez e elementos geométricos, variáveis ambientais como temperatura e umidade.

Após a análise do processo de medição com a sonda de gatilhamento, quatro variáveis foram selecionadas para o estudo: velocidade de aproximação do apalpador (A), direção de aproximação (B), orientação do apalpador (C) e número de pontos medidos (D). Estas variáveis foram investigadas em dois níveis ou dois valores cada uma, codificados em -1 ou +1. Um Planejamento ou Projeto Fatorial 2^4 foi escolhido para investigar estas quatro variáveis e suas interações.

A velocidade de aproximação do apalpador (A) foi controlada pelo operador da MMC durante os ensaios, de forma a obter uma aproximação lenta (-1) ou rápida (+1). A direção de aproximação (B) foi controlada adotando a direção radial (-1) ou direção dos eixos de coordenadas X, Y ou Z (+1). A orientação do apalpador (C) foi adotada vertical (-1) ou em um ângulo de 45° de inclinação (+1). A variável número de pontos (D) foi estudada com 20 pontos (-1) ou 40 pontos (+1).

Para realização das medições, os valores destas variáveis foram alterados conforme os níveis indicados no Planejamento Fatorial 2^4 . Isto resultou em 16 combinações experimentais (ensaios), cujo arranjo está mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Planejamento Fatorial 2^4

Ensaio	Variáveis				Erros de Medição
	A	B	C	D	
1	-	-	-	-	
2	+	-	-	-	
3	-	+	-	-	
4	+	+	-	-	
5	-	-	+	-	
6	+	-	+	-	
7	-	+	+	-	
8	+	+	+	-	
9	-	-	-	+	
10	+	-	-	+	
11	-	+	-	+	
12	+	+	-	+	
13	-	-	+	+	
14	+	-	+	+	
15	-	+	+	+	
16	+	+	+	+	

Neste experimento não foi possível quantificar a velocidade de medição (variável A), que deve ser sempre menor que a velocidade de deslocamento [13]. Aumentar a velocidade de medição resulta no aumento da força de toque do objeto a ser medido e aumento do deslocamento da haste do apalpador no momento do toque do apalpador e o

momento de captura do ponto. Isto conseqüentemente afetará o erro e a incerteza de medição. Quando o apalpador é qualificado com a mesma velocidade usada no processo de medição, esse efeito é minimizado. É necessário estabelecer uma velocidade de medição que não seja tão rápida, pois produz uma força de contato grande, nem tão baixa [13].

Outro cuidado extremamente importante nesse processo diz respeito à “distância da apalpação”, pois ocorrerá uma mudança de velocidade, antes do contato com a superfície. A máquina sofre influencias causadas pela vibração da aceleração e da desaceleração, necessitando de um período depois dessa mudança para minimizar a influência no resultado. Quanto maior a distâncias de apalpação, menor será a variação da posição do apalpador, possibilitando que o mesmo atinja um estado estável. Na prática, deve-se definir uma relação adequada entre a distância e a precisão requerida nos resultados [13], sendo esta variável mantida constante neste trabalho.

3. RESULTADOS

A esfera da extremidade do apalpador foi qualificada pela determinação do diâmetro, igual a 2,996 mm. Este valor não influenciou os resultados do experimento devido à utilização de um objeto padrão esférico, uma vez que o diâmetro do apalpador é compensado no cálculo dos resultados. A figura 3 apresenta os pontos capturados pelo sistema de apalpação da MMC neste processo, na tela do software da MMC.

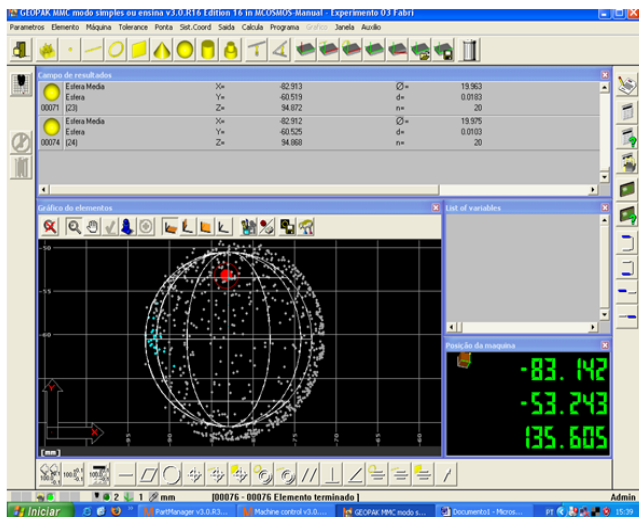


Fig. 3. Pontos Capturados ao Medir a Esfera de Referência.

Os ensaios do Planejamento Fatorial 2^4 foram realizados em uma seqüência aleatória, definida por um sorteio, para aleatorizar o efeito de qualquer variável não considerada no experimento. A esfera padrão de cerâmica foi medida tomando seis repetições de cada valor de diâmetro, sendo que os erros foram determinados pela diferença em relação ao valor do diâmetro do padrão. Os valores de erros obtidos estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Resultado dos Erros das Medições

Ensaio	Erros de Medição (mm)					
	1	2	3	4	5	6
1	0.0016	-0.0004	-0.0024	0.0006	0.0006	0.0036
2	-0.0054	-0.0084	-0.0054	-0.0004	-0.0004	0.0016
3	0.0016	-0.0004	-0.0024	-0.0004	0.0016	-0.0004
4	-0.0104	-0.0164	-0.0174	0.0026	0.0026	-0.0014
5	0.0026	0.0006	0.0016	0.0006	0.0026	0.0026
6	-0.0094	-0.0124	-0.0134	-0.0004	0.0016	-0.0004
7	-0.0024	-0.0004	-0.0054	0.0016	0.0006	0.0016
8	-0.0104	-0.0124	-0.0144	-0.0004	-0.0004	-0.0004
9	-0.0024	-0.0004	-0.0054	0.0316	0.0006	0.0006
10	-0.0224	-0.0234	-0.0214	-0.0024	-0.0094	-0.0094
11	-0.0104	-0.0134	-0.0054	0.0026	0.0006	-0.0004
12	-0.0164	-0.0094	-0.0084	-0.0134	-0.0014	-0.0104
13	-0.0054	-0.0064	-0.0074	0.0006	-0.0014	-0.0024
14	-0.0064	-0.0124	-0.0104	-0.0054	-0.0074	-0.0114
15	-0.0074	-0.0094	-0.0104	0.0006	-0.0034	-0.0004
16	-0.0104	-0.0094	-0.0074	-0.0064	-0.0064	-0.0084

A análise dos resultados foi feita através da técnica da Análise de Variância (ANOVA), aplicada sobre os erros de medição. A soma de quadrados (SQ) associada às variáveis foi determinada, sendo que as SQ associadas às interações entre as variáveis foram adicionadas à soma de quadrados do Erro. Assim, a soma de quadrados do Erro apresenta a variabilidade associada às repetições nos resultados e às interações entre variáveis, tendo sido usada como referência para executar a análise pela estatística F de Snedecor.

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise ANOVA, indicando o número de graus de liberdade (GL), quadrados médios (QM calculado por SQ dividido pelo respectivo GL), estatística F (razão do QM considerado pelo QM do Erro) e probabilidade associada ao valor F calculado. A probabilidade do valor F foi determinada da distribuição F de Snedecor, de acordo com o número de graus de liberdade da variável e do Erro.

Tabela 3. Análise de Variância

Variável	Soma de Quadrados	Grau de Liberdade	Quadrado Médio	Razão de Variâncias (F)	Probabilidade
A	1176	1	1176	31.17	0
B	51.04	1	51.042	1.35	0.2478
C	2.67	1	2.667	0.07	0.7909
D	345.04	1	345.042	9.15	0.0032
Erro	3433.042	91	37.726		
Total	37.726	95			

Nesta tabela, pode-se observar que os valores de QM para as variáveis A e D foram maiores que os QM das demais variáveis e do Erro, sendo que os valores de F calculados apresentam esta relação. Da distribuição da estatística F, observa-se que os valores de probabilidade associados à estas variáveis são muito reduzidos, aproximadamente zero (0 %) para A e 0,32 % para D. Assim, foi concluir que as variáveis velocidade de aproximação do apalpador (A) e número de pontos (D) influenciaram os erros de medição do diâmetro da esfera de modo altamente significativo, adotando um nível de confiança ou probabilidade de 99%.

Uma análise através do gráfico de probabilidade normal foi realizada para confirmar os resultados da ANOVA. Os efeitos das variáveis e das interações entre as variáveis foram calculados através da análise de contrastes e, após ordenar os valores em sequência crescente, foram associados a valores de probabilidade esperada. Caso estes efeitos sejam correspondentes à variabilidade aleatória proveniente de uma distribuição normal de probabilidades, o gráfico deve resultar em uma reta. Os efeitos que se desviam desta reta são considerados como efeitos que influenciam significativamente o resultado.

A figura 4 apresenta o gráfico resultante, onde pode ser observado que as variáveis (A) e (D) influenciam significativamente os erros de medição da esfera. Este resultado foi equivalente ao obtido na ANOVA, servindo para validação da análise anterior.

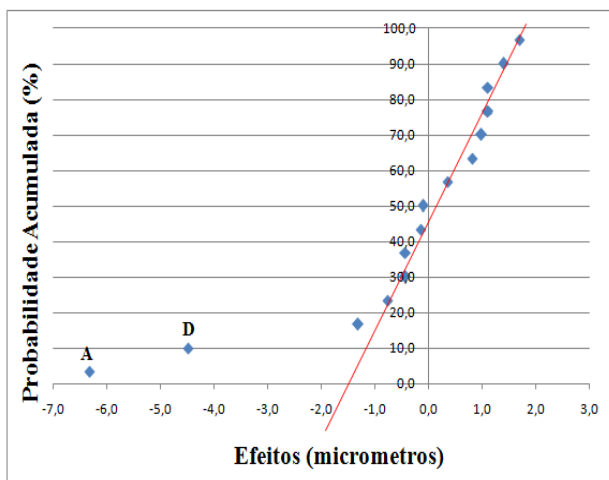


Fig. 4. Análise dos Efeitos pelo Gráfico de Probabilidade Normal.

A verificação da validade da análise estatística foi feita através da análise dos resíduos, para verificar as hipóteses de independência e distribuição normal, requisitos para executar as análises estatísticas propostas. Um modelo matemático foi estabelecido para determinar os valores estimados do erro de medição (y_e), considerando os efeitos das variáveis significativas sobre os erros e o valor médio do erro obtido. O modelo determinado com os resultados encontrados está apresentado pela Equação (1).

$$y_e = -4,8 + A * (-6,3/2) + D * (-4,5/2) \quad (1)$$

Os resíduos foram encontrados pela diferença entre os valores determinados experimentalmente para os erros de medição e os valores estimados pelo modelo da equação (1). Os resíduos foram inseridos em um gráfico de probabilidade normal, apresentado na figura 5. Através do gráfico, pode-se observar que a hipótese da normalidade dos resíduos não pode ser rejeitada.

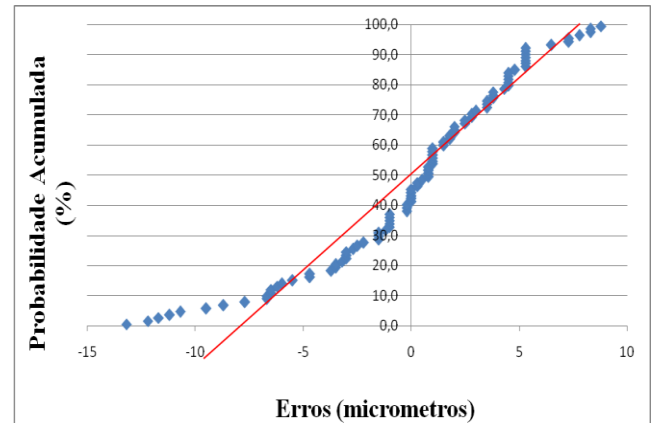


Fig. 5. Probabilidade Normal de Resíduo

O efeito das variáveis Velocidade e Número de pontos foi analisado separadamente através dos gráficos das figuras 6 e 7. Os gráficos mostram a variação no erro médio do diâmetro medido em função da alteração das variáveis do nível -1 para o nível +1.

Na figura 6, observa-se que o emprego de uma velocidade menor (-1) na operação da sonda resultou em um erro médio de $-1,6 \mu\text{m}$, ao passo que maiores velocidades (+1) resultou em um erro médio de $-7,9 \mu\text{m}$.

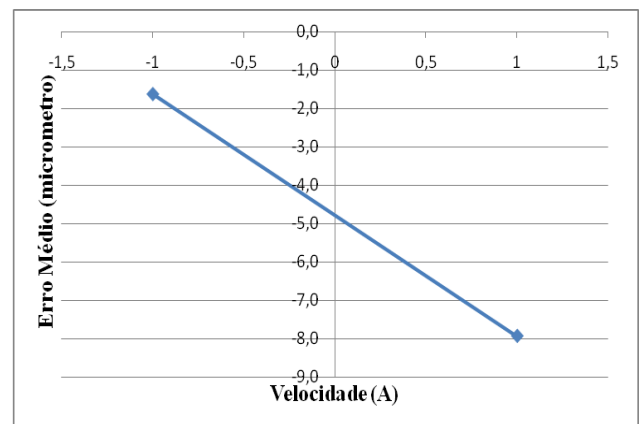


Fig. 6. Efeito da variável Velocidade (A) sobre os Erros de Medição.

Na figura 7, observa-se que a medição com um número menor de pontos (-1) resultou em um erro médio de $-2,5 \mu\text{m}$

no valor do diâmetro, ao passo que um número maior de pontos (+1) resultou em um erro médio de $-7,0 \mu\text{m}$.

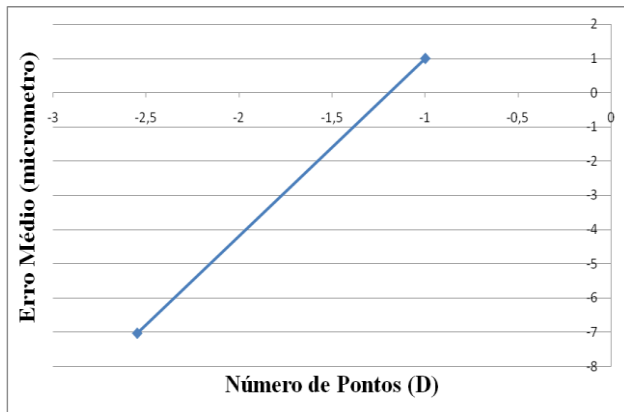


Fig. 7. Efeito da variável Número de Pontos (D) sobre os Erros de Medição.

4. CONCLUSÕES

Um estudo para verificar a influência de variáveis que afetam as medições dinâmicas realizadas em MMC's usando sondas com contato foi realizado. Um experimento foi planejado e executado para investigar quatro variáveis do processo de medição com sondas de gatilhamento, tendo sido estudadas a velocidade de aproximação, a direção de aproximação, a orientação do apalpador e o número de pontos medidos. Cada variável foi estudada em dois valores (níveis), sendo determinados os valores do diâmetro de uma esfera de cerâmica. Os erros das medições foram determinados e utilizados para a análise pela técnica de Análise de Variância.

A metodologia permitiu uma avaliação do efeito das variáveis envolvidas no processo de medição e demonstrou que dentre as variáveis estudadas, a velocidade de aproximação do apalpador (A) é a que mais influencia nos erros no processo de medição, seguida do número de pontos (D). Recomenda-se o emprego de uma menor velocidade de aproximação da sonda e um número maior de pontos para reduzir o erro de medição do diâmetro de superfícies com geometria esférica. Contudo, novos experimentos controlando quantitativamente a velocidade podem proporcionar uma avaliação e compensação dos erros associados a esta variável.

AGRADECIMENTOS

Ao Decanato de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade de Brasília (DPP - UnB) pelo apoio financeiro para este trabalho.

REFERÊNCIAS

[1] T. J. Esward, C. Elster, J. P. Hessling, *Analysis of dynamic measurements: New challenges require new*

solutions. In Proceedings of XIX IMEKO World Congress, Lisboa, Portugal, Setembro, 2009.

- [2] C. Clark, "The Practice of Dynamic Pressure Measurement. Measurement & Control, vol. 22, nº 10, pag. 258 - 301, 1989.
- [3] G. D. Donatelli, A. A. Gonçalves, C. A. Schneider, G. Pfeiffer, *Metrologia Geométrica na Indústria: tendências e desafios*, Min. do Desenv. Indust. E Com. Ext, SENAI, Série Política Industrial, vol 12, Brasília-DF, 2005.
- [4] A. Piratelli-Filho B. D. Giacomo, *CMM Uncertainty Analysis with Factorial Design*, Precision Engineering 27 (2003) 283 - 288, 2003.
- [5] C. Dong, C. Zhang; B. Wang, G. X. Zhang, *Reducing the Dynamic Errors of Coordinate Measuring Machines*. ASME J. Mech. Design 124(4):831-839.2003.
- [6] P. H. Pereira, R. J. Hocken, *Characterization and Compensation of Dynamic Errors of a Scanning Coordinate Measuring Machine*, Precision Engineering 31 (2007) 22 - 32, 2003.
- [7] G. Wang, Z. Luo, *Dynamic Errors Analysis of CMM Touch Trigger Probes*, 9ª International Conference on Electronic Measurement & Instruments, China, 2009.
- [8] A. Piratelli-Filho ; F. L.Morais, *Alternative approaches to check performance of articulated arm CMM*. In: 14º Congres International de Metrologie, Paris, França, Junho, 2009.
- [9] C. Z. Viana, *Sistemática para a padronização de estratégias de medição por coordenadas na cadeia de suprimentos da indústria automotiva*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Dezembro, 2005.
- [10] <http://www.renishaw.com/en/7385.aspx>. Acessado em 13 de junho de 2011.
- [11] http://www.mezertec.co.kr/reni/2_2.htm. Acessado em 13 de junho de 2011.
- [12] WILHELM, R.G.; HOCKEN, R.; SCHWENKE, H. Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement. In: CIRP, n. 50, 2001. Anais... 2001. p. 553-563.
- [13] FLACK, D. *CMM Probing - Measurements Good Practice Guide*. N. 43. Teddington: HMSO, 2001.
- [14] INMETRO, *Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados*, 1ª edição brasileira do VIM 2008, Rio de Janeiro, Brasil, 2009. 78p.