

## **Investigação experimental do efeito do sistema de coordenadas da peça na avaliação dimensional de geometrias**

Alvaro José Abackerli, [abakerli@ipt.br](mailto:abakerli@ipt.br)<sup>1</sup>  
Paulo Henrique Pereira, [pereira\\_paulo\\_h@cat.com](mailto:pereira_paulo_h@cat.com)<sup>2</sup>  
Maria Célia de Oliveira Papa, [mcopapa@unimep.br](mailto:mcopapa@unimep.br)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Av. Prof. Almeida Prado 532, São Paulo – SP, 05508-901

<sup>2</sup>Caterpillar Inc., 100 Tractor Dr, East Peoria, IL 61630, USA

<sup>3</sup>Universidade Metodista de Piracicaba, Rod. Luis Ometto km 1, Santa Bárbara d'Oeste – SP, 13451-900

**Resumo:** Há muito tempo as máquinas de medir por coordenadas – MMCs são bastante utilizadas no controle geométrico e dimensional de produtos da indústria metal-mecânica, sendo responsáveis pelo fornecimento de informações qualitativas e quantitativas sobre as características do produto manufaturado. De modo geral, o processo de medição nestas máquinas envolve procedimentos clássicos como a qualificação do sistema apalpador (probe qualification), a definição de sistemas de coordenadas na peça medida (part coordinate systems – PCS) e a definição das referências de medição (datum systems), além da estratégia de medição propriamente dita. Simulações da medição em MMCs mostram que a definição inadequada do sistema de coordenadas da peça (PCS) pode consumir frações significativas da capacidade de medição da máquina e fornecer informações incorretas sobre a qualidade das peças manufaturadas. Este problema se torna ainda mais grave no controle das chamadas superfícies livres (freeform surfaces), quando as coordenadas dos pontos da superfície e os respectivos sistemas de referência (datum systems) constituem a única informação disponível para a verificação do resultado da manufatura no contexto de engenharia reversa. Neste trabalho, toma-se uma peça padrão com elementos geométricos regulares para mostrar por meio de experimentação o efeito negativo da má definição do sistema de coordenadas na medição das geometrias, mesmo em situações bastante convencionais. Os resultados apontam para os cuidados necessários com os sistemas de coordenadas envolvidos, sem os quais a verificação da qualidade do produto manufaturado pode ficar severamente comprometida.

**Palavras-chave:** medição por coordenadas, inspeção, erros.

### **1. INTRODUÇÃO**

O avanço da qualidade e a necessidade de customizações têm impulsionado o uso de superfícies complexas em projetos de novos produtos, tanto para atendimento de requisitos funcionais quanto estéticos. Para acompanhar a evolução dos processos de usinagem com vários eixos e altas velocidades, processos estes atualmente já habilitados a produzir as superfícies complexas e por isso, usados nesta customização crescente, também as medições têm sido impulsionadas a dar respostas importantes sobre a qualidade do item manufaturado, seja para a realimentação e a correção do processo de manufatura ou para a realimentação do projeto do produto no contexto da engenharia reversa.

Em termos gerais e sob o enfoque puro da medição, os procedimentos de engenharia reversa envolvem várias etapas que dependem dos recursos disponíveis para a avaliação das superfícies, tais como, a capacidade de medição requerida, o tipo de peça fabricada, a característica medida, dentre outras. Por exemplo, Sansoni *et al.* (2005) descrevem um procedimento composto de quatro etapas para ser usado com um instrumento de medição que funciona por digitalização óptica; são elas: i) a medição óptica da peça; ii) o processo de alinhamento; iii) a geração da representação NURBS (Non-uniform rational B-splines) da superfície; e iv) a produção dos modelos CAD que descrevem a peça medida. Mesmo que estas etapas sejam particulares e dedicadas a um instrumento ou método de medição específico, ou a uma família, elas caracterizam procedimentos típicos da engenharia reversa nos quais podem ser identificados alguns problemas clássicos. Estes problemas são comuns a vários contextos, tais como a estratégia de amostragem (localização e quantidade de pontos), o cálculo da geometria, os efeitos da superfície usinada sobre a medição e a definição das referências para a medição, dentre outros.

Para equacionar os problemas típicos desse contexto inúmeras pesquisas já foram feitas e um grande número delas se dedicou a definir estratégias para determinar a localização ótima de pontos amostrais. É o que se verifica nos trabalhos de Kim e Raman (2000), Gao *et al.* (2004), Prakashvudhisarn e Raman (2004), Cruz e Raman (2005) ou a quantia de pontos amostrais, Capelo e Semerano (2000), dependendo dos requisitos da medição e do tipo de

característica medida. Por outro lado, trabalhos de Capello e Semeraro (2001a-b), Samuel e Shunmugam (2000-03), Summerhays *et al* (2002) e Brazhkin e Mirotvorskii (2005) buscaram estratégias computacionais otimizadas para cálculo das chamadas “geometrias substitutas”, ou ainda estratégias para a determinação de parâmetros característicos de tolerâncias de forma e posição (*Geometric & Dimensioning Tolerancing – GD&T*) que comparam a peça fabricada com suas especificações de projeto, como se vê também em Jiang e Chiu (2002).

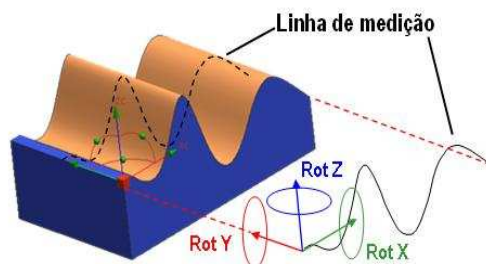
Mesmo entre os problemas clássicos, os condicionantes das medições e as expectativas sobre os resultados são particularmente mais rigorosas e demandam procedimentos especiais que vão além das abordagens clássicas. Este é o caso quando medições de alto desempenho são desejadas para inspecionar peças usinadas com alta qualidade, situação na qual a integração direta entre CAD-CAM-CAE via medição tridimensional não deve ser feita sem considerar as diferenças existentes entre a peça real manufaturada e os seus modelos CAD, pois a primeira é influenciada pelos erros da própria usinagem. É nesse contexto que Cho e Seo (2005) propõem a inclusão de informações geométricas da peça efetivamente fabricada para gerar estratégias otimizadas de medição. A abordagem geral consiste em prever via simulação a forma da superfície que será usinada, considerando o desempenho da usinagem, da medição e as tolerâncias atribuídas à peça. Com base nessa previsão é possível determinar uma estratégia de medição que considere os erros da superfície a ser usinada e os utilizem para determinar a amostragem ótima para a avaliação da própria peça.

A idéia geral de Cho e Seo (2005) é selecionar os melhores pontos amostrais da superfície usinada, porém considerando que ela não corresponde exatamente ao seu modelo CAD. Segundo os autores, isso pode ser feito usando duas estratégias simultâneas e complementares: i) movendo os pontos amostrais para posições sujeitas aos maiores erros de usinagem, e; ii) selecionando pontos amostrais com base no caminho da ferramenta, de modo a evitar as eventuais cristas também geradas pelo processo de usinagem. Ou seja, usam-se também as informações sobre os pontos de contato da ferramenta-peça para selecionar os pontos amostrais de inspeção, informações estas obtidas usando simulações do processo de usinagem. Estratégias como estas que beneficiam a amostragem sob o enfoque da medição e consideram a peça real a ser produzida podem agravar outros aspectos do problema, razão pela qual são inúmeras as abordagens que ponderam outras nuances envolvidas, a exemplo da medição de superfícies livres que tem condicionantes específicos como discutido em Smith *et al* (2002), Elkott *et al.* (2002), Li e Liu (2003), Li e Gu (2004), Elkott e Veldhuis (2005) e Galetto e Vezzetti (2006).

Independente do objetivo da medição e dos detalhes específicos do seu planejamento, incluindo a engenharia reversa que muitas vezes é a sua razão, invariavelmente é assumido um profundo conhecimento do volume de trabalho onde a peça é colocada. Esse volume é tipicamente expresso por relações conhecidas entre os sistemas de coordenadas da peça idealizada (CAD), da peça real (usinada) e do instrumento de medição (MMC), que em conjunto caracterizam o problema de localização já discutido há anos por Gou *et al.* (1998), Spitz (1999), Xiong (2004) e Wang (2004).

Qualquer que seja a abordagem para a definição da estratégia de medição, a questão relevante no processo de inspeção é que as medições subsequentes à localização da peça serão no máximo tão boas quanto às definições iniciais das referências (*Datum systems*). Estudos recentes por simulação (Abackerli, 2007) mostraram que mesmo pequenos problemas na localização podem gerar erros significativos na avaliação da peça, erros esses capazes de confundir a análise do processo de usinagem. A

Figura 1 ilustra um exemplo discutido a seguir.



**Figura 1. Simulação de medição de superfície livre; (Abackerli, 2007).**

Neste caso específico, a peça ilustrada na

Figura 1 foi usinada com alta velocidade (*High Speed Machining – HSM*) e posteriormente medida em uma máquina de medir por coordenadas CNC com eixos de 705, 605 e 505 milímetros de comprimento, resolução de 0.1  $\mu\text{m}$  em cada eixo e erros máximos permissíveis iguais a  $MPE_P = 1.9 \mu\text{m}$  e  $MPE_E = 1.9 + 3L/1000 \mu\text{m}$ , para L dado em metros quando a máquina é equipada com apalpador TP200 (ISO, 2001). As medições foram feitas em ambiente com  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , obedecendo portanto às recomendações do fabricante. Também foram tomados os cuidados básicos com relação à limpeza, ao tempo de estabilização e à fixação da peça. Demais cuidados secundários também seguiram as boas práticas de medição.

Estes parâmetros de medição foram usados apenas para avaliar o efeito da incerteza devida ao  $MPE_P$  sobre a localização da peça, assumindo uma distribuição retangular para este fator (ISO, 1995). Para a definição do sistema de coordenadas da peça adotou-se a estratégia mais básica e frequentemente utilizada no “chão-de-fábrica”, qual seja, a medição de plano, reta e ponto, conhecido como esquema 3-2-1 para a localização da peça. A Tabela 1 mostrada a seguir ilustra os resultados encontrados quando 1000 simulações foram executadas da medição do perfil acima descrita.

**Tabela 1. Resultados da simulação do problema de localização (Abackerli, 2007).**

	Coordenadas [mm]			Erros Absolutos [mm]												
	P <sub>i</sub>	X	Y	Z	Eixo X			Eixo Y			Eixo Z			3D		
					Máximo	Médio	Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo
Simulação 1	1	0	0	0												
	2	5	30	0												
	3	0	60	0	24,0	6,0	0,03	10,0	2,0	0,02	98,0	26,0	0,16	101,0	26,0	0,17
	4	27	0	18												
	5	79	0	5												
	6	0	20	-5												
Simulação 2	1	0	0	0												
	2	80	30	0												
	3	0	60	0	5,0	1,2	0,00	5,0	1,4	0,01	5,0	1,4	0,01	9,0	2,3	0,01
	4	0	0	-5												
	5	80	0	-5												
	6	0	10	0												

As coordenadas X, Y e Z contidas na Tabela 1 mostram as duas estratégias usadas para definição do sistema de coordenadas da peça da

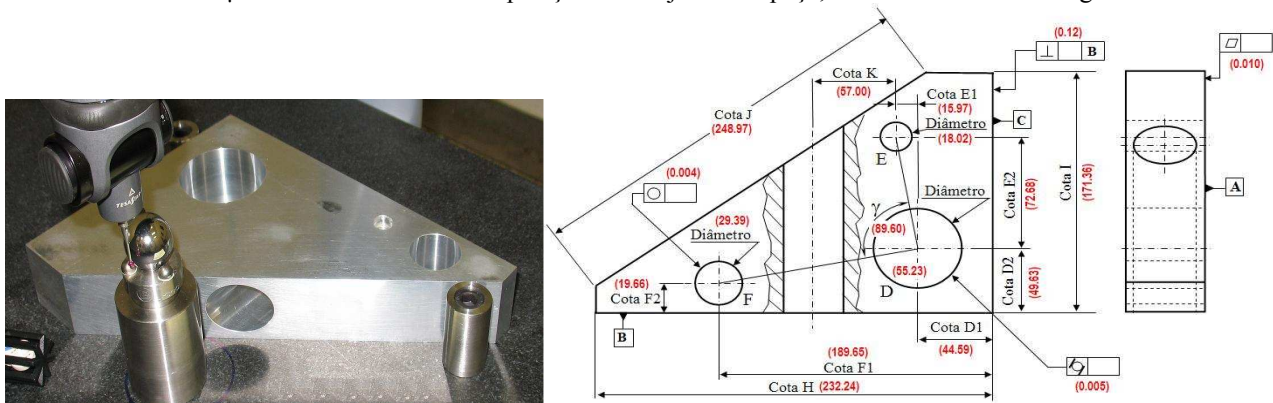
Figura 1, diferindo apenas por serem usados pontos agrupados (Simulação 1) ou pontos espaçados (Simulação 2) na medição da referência da peça com o esquema 3-2-1. Na Tabela, os pontos P<sub>i</sub> identificados por 1, 2 e 3 foram usados para definir o plano XY, os pontos 4 e 5 para definir a orientação de X e a origem de Y. O ponto 6 foi usado para definir a origem do eixo X em cada simulação. Como pode ser notado pelos resultados da simulação 2, ocorre neste caso a queda significativa de todos os erros pela melhor distribuição dos pontos P<sub>i</sub> que gera um melhor condicionamento do problema de localização, mesmo sob efeito das mesmas incertezas oriundas de MPE<sub>p</sub>. Observa-se com particular destaque os erros em Z de 98, 26 e 0.16 µm que são reduzidos para 5, 1.4 e 0.01 µm respectivamente, mostrando a instabilidade causada na localização da peça se uma superfície inadequada como a da simulação 1 for usada para definir o sistema de coordenadas a partir do qual o perfil mostrado na

Figura 1 é medido. É relevante ainda frisar que valores desta ordem de grandeza são comuns em casos práticos, mesmo quando melhores posicionamentos de pontos são usados no processo de localização. Basta lembrar que nas simulações discutidas apenas uma pequena parcela da incerteza presente na medição foi considerada, aquela originada do MPE<sub>p</sub>, não tendo sido incluídos outros fatores comuns como o acabamento superficial (forma e rugosidade), a fixação da peça e os efeitos de temperatura, dentre outros (Wilhelm *et al.*, 2001).

Com base nestas evidências, um experimento planejado foi executado para demonstrar que o problema da localização na medição por coordenadas é extremamente relevante, mesmo entre outros fatores potencialmente capazes de interferir nos resultados da medição. Nos tópicos a seguir discute-se o experimento realizado e os resultados dele obtidos.

## 2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

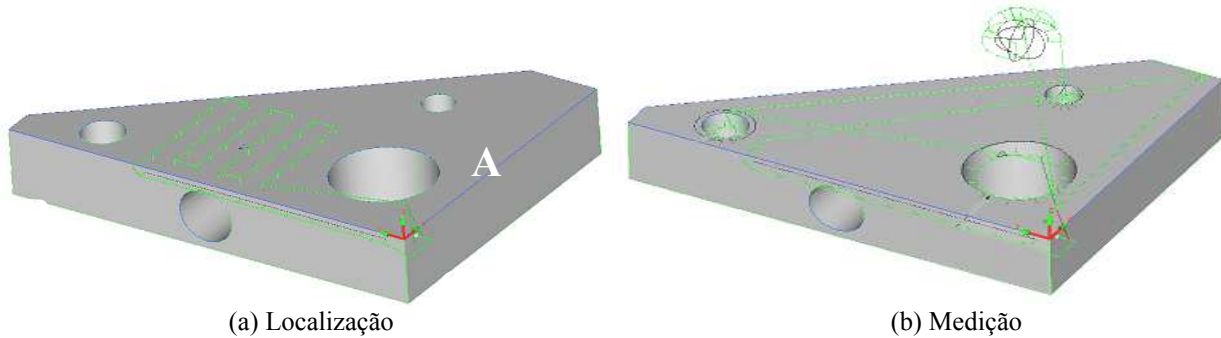
Para demonstrar empiricamente a influência da localização nos resultados da medição, a peça padrão mostrada na Figura 2 foi utilizada para um experimento cujos detalhes são discutidos a seguir. A peça teve vários diâmetros e distâncias medidas no experimento. Para incluir uma geometria tridimensional, uma esfera padrão de 25.4 mm e erro de forma inferior a 0.25 µm foram introduzida em posição fixa adjacente à peça, conforme ilustrada a Figura 2.



**Figura 2. Peça padrão usada no experimento.**

O procedimento geral de medição, executado na MMC obedeceu a práticas comuns da área e envolveu a qualificação do sistema apalpador, com a esfera padrão de 15.88 mm, a definição de um sistema estável de coordenadas para a localização inicial da peça e, posteriormente, as medições conforme planejamento experimental abaixo descrito. A localização inicial foi estabelecida com a estratégia “plano-reta-ponto” (esquema 3-2-1) usando as superfícies “A”, “B” e “C” da

Figura 3-a, com 48 pontos para a definição do plano, 11 pontos para a definição da reta e 1 ponto para origem do sistema de coordenadas.



**Figura 3. Localização e medição da peça padrão.**

Conforme a

Figura 3-b, cada ciclo de medição envolveu inicialmente a definição de um sistema de coordenadas da peça pelo esquema 3-2-1, usando pontos compactos ou espaçados; Tabela 2. Seguiu-se a avaliação dos diâmetros dos furos de 55.23 mm ( $C_1$ ), de 29.39 mm ( $C_2$ ) e de 18.02 mm ( $C_3$ ), a 5 mm de profundidade a partir do plano “A”. Para todas as medições dos círculos foi utilizada uma estratégia fixa com 11 pontos igualmente espaçados, determinando-se a partir deles os diâmetros ( $DC_i$ ), as coordenadas dos centros em relação ao sistema de coordenadas da peça ( $CC_{ix}$ ,  $CC_{iy}$ ) e os erros de circularidade ( $EC_i$ ). A esfera de 25.4 mm medida teve avaliado o diâmetro ( $DS_1$ ) e as coordenadas do seu centro ( $CS_{1x}$ ,  $CS_{1y}$  e  $CS_{1z}$ ). Para medição da esfera foram usados 13 pontos em 3 linhas paralelas ao equador, além do ponto no pólo, com distribuição definida segundo procedimento automático de medição da máquina. Os caminhos de medição são também ilustrados na

Figura 3-b.

O experimento propriamente dito foi completamente aleatorizado com três ciclos de medição, que se configuraram como repetições experimentais mediante variação dos três primeiros fatores mostrados na Tabela 2 em dois níveis (alto e baixo) para cada combinação desses fatores. Isso resultou num total de  $2^3$  combinações, que com as três repetições resultaram em 24 experimentos para cada comprimento de ponta do apalpador. Com esta estratégia experimental o comprimento da ponta atuou como fator de blocagem, resultando num total de 48 experimentos e sendo desta forma considerada na análise final dos resultados.

**Tabela 2 – Fatores experimentais**

<i>Variáveis</i>		<i>Níveis</i>	
		<b>-1 (baixo)</b>	<b>+1 (alto)</b>
<b>Fatores</b>	Velocidade de medição (Vel)	2.54 mm/s	7.62 mm/s
	Distâncias de aproximação e recuo (Dist)	2 mm	5 mm
	Espaçamento dos pontos amostrais na localização 3-2-1 (PCS)	Compacto	Espaçado
<b>Bloco</b>	Comprimento da ponta do apalpador (L)	21 mm	51 mm

Para a definição dos sistemas de coordenadas compacto ou espaçado em cada ciclo, Tabela 2, foram usadas as coordenadas mostradas Tabela 3 e também aplicado o esquema 3-2-1 já citado.

Durante o experimento a máquina de medir operou com aceleração de  $10 \text{ mm/s}^2$  e com compensação térmica ativada, porém não se monitorou a temperatura da peça cujo coeficiente de expansão térmica é de aproximadamente  $21.8 \text{ ppm}^\circ\text{C}$ . Por esta razão, a temperatura inicial ( $T_{mi}$ ) e final ( $T_{fm}$ ) de cada ciclo de medição foi registrada para posterior análise junto aos resultados.

Dos experimentos foram avaliadas 21 variáveis obtidas diretamente como resultado das medições, correspondendo às informações mostradas na Tabela 4 para os três círculos e para a esfera, além das coordenadas da origem da peça (PCS) que são de especial interesse nesse estudo porque definem a localização.

Além destas informações, para avaliar a rotação das geometrias em cada localização, calculou-se o módulo do vetor tridimensional  $V_3$ , que aponta para o centro de cada geometria medida, o ângulo de azimute ( $\phi$ ), que posiciona

horizontalmente a geometria em relação à origem, e o ângulo de elevação ( $\theta$ ), que posiciona verticalmente o centro da esfera. As expressões de 1 a 3 a seguir ilustram os cálculos desses resultados, onde  $X_c$ ,  $Y_c$  e  $Z_c$  correspondem às coordenadas medidas do centro de cada geometria conforme descritas na Tabela 4.

**Tabela 3 – Definição do sistema de coordenadas da peça (PCS).**

Nível do fator (PCS)	Elemento Geométrico	Ponto	Coordenadas nominais X, Y, Z <sup>1</sup>
+ 1 (alto)	Plano	1	7, 7, 0
		2	163, 7, 0
		3	7, 163, 0
	Reta	4	0, 163, -3
		5	0, 7, -3
		6	7, 0, -3
- 1 (baixo)	Plano	1	7, 7, 0
		2	21, 7, 0
		3	14, 21, 0
	Reta	4	0, 21, -3
		5	0, 3, -3
		6	7, 0, -3

<sup>1</sup> – Coordenadas X, Y e Z dadas em milímetros.

**Tabela 4 – Variáveis resposta do experimento.**

Variável	Informação	
Temperatura	T <sub>ini</sub>	Temperatura inicial do ciclo
	T <sub>fin</sub>	Temperatura final do ciclo
Coordenadas da origem	AE <sub>x</sub>	Coordenada X da origem (PCS)
	AE <sub>y</sub>	Coordenada Y da origem (PCS)
	AE <sub>z</sub>	Coordenada Z da origem (PCS)
Círculo 1	CC <sub>1x</sub>	Coordenada X do centro
	CC <sub>1y</sub>	Coordenada Y do centro
	DC <sub>1</sub>	Diâmetro do círculo 1
	EC <sub>1</sub>	Circularidade do círculo 1
Círculo 2	CC <sub>2x</sub>	Coordenada X do centro
	CC <sub>2y</sub>	Coordenada Y do centro
	DC <sub>2</sub>	Diâmetro do círculo 2
Círculo 3	EC <sub>2</sub>	Circularidade do círculo 2
	CC <sub>3x</sub>	Coordenada X do centro
	CC <sub>3y</sub>	Coordenada Y do centro
	DC <sub>3</sub>	Diâmetro do círculo 3
Esfera	EC <sub>3</sub>	Circularidade do círculo 3
	CS <sub>1x</sub>	Coordenada X do centro
	CS <sub>1y</sub>	Coordenada Y do centro
	CS <sub>1z</sub>	Coordenada Z do centro
Vetores posição das geometrias	DS <sub>1</sub>	Diâmetro
	VCC <sub>1</sub>	Módulo do vetor V3 para o círculo 1
	FCC <sub>1</sub>	Ângulo $\phi$ para o círculo 1
	VCC <sub>2</sub>	Módulo do vetor V3 para o círculo 2
	FCC <sub>2</sub>	Ângulo $\phi$ para o círculo 2
	VCC <sub>3</sub>	Módulo do vetor V3 para o círculo 3
	FCC <sub>3</sub>	Ângulo $\phi$ para o círculo 3
	VCS <sub>1</sub>	Módulo do vetor V3 para a esfera
FCS <sub>1</sub>	Ângulo $\phi$ para a esfera	
TCS <sub>1</sub>	Ângulo $\theta$ para a esfera	

$$V3 = \sqrt{Xc^2 + Yc^2 + Zc^2} \quad (1)$$

$$\phi = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{Yc}{Xc}\right) \quad (2)$$



$$\theta = \text{Tan}^{-1} \left( \frac{Zc}{\sqrt{Xc^2 + Yc^2}} \right) \quad (3)$$

Executando os experimentos na forma discutida, com três fatores em dois níveis cada, três repetições e dois blocos, conseguem-se 39 graus de liberdade para os resíduos que possibilitam aplicar adequadamente a Análise de Variância – ANOVA (Montgomery, 2005) sobre os resultados, neste caso usando modelos de efeitos fixos para ponderar os fatores experimentais apenas nos níveis efetivamente usados nas medições. A análise dos resultados envolve a aplicação inicial da ANOVA com a conseqüente análise de normalidade pelo método de Shapiro-Wilk. O teste de Tukey é então aplicado para os fatores significativos no nível de significância de 5%, ou para o desdobramento das interações significativas dos fatores, analisando-se pelo p-valor a influência de cada fator sobre os resultados dos testes.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes de examinar os resultados pelos procedimentos estatísticos acima descritos, cabe uma avaliação global do comportamento dos resultados a partir da sua síntese mostrada na Tabela 5. O primeiro aspecto relevante a destacar é a pequena variação observada em todas as variáveis respostas ao longo de todos os 48 testes, merecendo destaque apenas a coordenada CS1z do centro da esfera com um desvio padrão de aproximadamente 21  $\mu\text{m}$ , que posteriormente se revela importante porque denuncia os efeitos da definição do plano XY do PCS com pontos pouco espaçados; nível baixo para o fator PCS do experimento (Tabela 2). Demais valores mostram resultados muito próximos cujos detalhes serão discutidos no contexto da análise de variância - ANOVA.

**Tabela 5 – Resultados gerais das medições.**

Variável	Média	Desv.Pad.	Max.	Min.	Variável	Média	Desv.Pad.	Max.	Min.
Tini	22,29	0,1	22,5	22,1	CS1y	105,53	7,06	105,55	105,52
Tfin	22,29	0,09	22,5	22,1	CS1z	43,42	21,24	43,44	43,39
AEx	-1,72	1,02	0,3	-3,6	VCC1	66,68	1,06	66,68	66,68
AEy	3,22	0,96	5	0,9	VCC2	19,65	1,05	190,65	190,64
AEz	-10,34	1,44	-8,6	-12,5	VCC3	136,46	1,08	136,46	136,45
EC1	3,75	1,31	7,1	1,7	VCS1	192,02	1,35	192,02	192,02
EC2	5,66	1,54	9,6	2,4	DC1	55,23	0,93	55,23	55,23
EC3	4,26	1,3	6,4	1,9	DC2	29,39	1,05	29,39	29,39
CC1x	49,62	1,43	49,62	49,62	DC3	18,01	0,92	18,02	18,01
CC1y	44,54	1,31	44,55	44,54	DS1	25,4	1,22	25,4	25,4
CC2x	19,65	4,29	19,66	19,64	FCC1	41,91	0,001	41,92	41,91
CC2y	189,63	1,02	189,63	189,63	FCC2	84,08	0,001	84,09	84,08
CC3x	122,3	1,66	122,3	122,3	FCC3	26,33	0,001	26,33	26,33
CC3y	60,52	2,62	60,53	60,51	FCS1	34,35	0,002	34,35	34,35
CS1x	154,43	3,32	154,44	154,43	TCS1	13,07	0,007	13,08	13,06

Na Tabela 5, a temperatura é dada em  $^{\circ}\text{C}$ , os ângulos em graus, dimensões em milímetros e desvios padrão em micrômetros, exceto para os desvios padrões da temperatura e ângulos, que são dadas em graus Celsius e graus.

Também merece destaque inicial a temperatura, que mostrou uma variação máxima de  $0,4^{\circ}\text{C}$  do decorrer dos 48 testes, não exibindo variação superior a  $0,2^{\circ}\text{C}$  para uma dada combinação de fatores, desde o início até o final de cada ciclo de medição.

A Figura 4 mostra as temperaturas inicial e final de todos os 48 testes, onde se observa no teste sete a variação máxima de  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Nos demais testes a variação típica fica em torno de  $0,1^{\circ}\text{C}$ , e em vários deles não se observa qualquer variação dentro das condições de monitoramento de cada ciclo de medição.

Tomando o coeficiente de expansão térmica da peça de  $21,8 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$  e assumindo a variação máxima de  $0,4^{\circ}\text{C}$  num único ciclo, verificar-se-ia uma variação dimensional por influência da temperatura de  $1,6 \mu\text{m}$  quando a esfera fosse medida e seu vetor posição VCS1 de aproximadamente 192 mm avaliado.

Assumindo uma variação mais realista de  $0,2^{\circ}\text{C}$  num único ciclo (vide teste sete na Figura 4), onde todas as características da peça foram medidas, ter-se-ia uma variação de  $0,8 \mu\text{m}$  por efeitos de temperatura assumindo a mesma dimensão máxima de 192 mm.

Considerando que efetivamente cada teste envolveu a localização da peça e a medição de 4 geometrias, considera-se que a variação da temperatura é desprezível em cada medição individual, assim como os seus efeitos sobre as características medidas da peça.

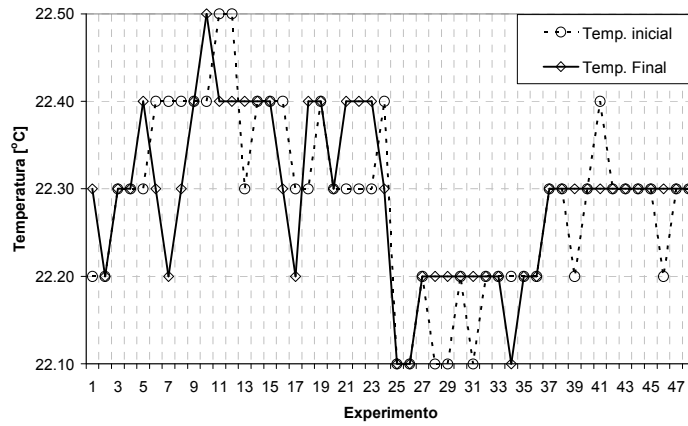


Figura 4. Variações de temperatura no experimento.

Além da temperatura, destacam-se as coordenadas da origem calculadas nos sucessivos processos de localização da peça, e diferentes condições experimentais. Nota-se na Figura 5 as coordenadas  $AE_x$ ,  $AE_y$  e  $AE_z$  obtidas nos 48 testes, padrões de variação gerados pelas combinações experimentais. Lembrando que o teste começa por uma localização inicial com maior densidade de pontos, a partir da qual, as demais 48 localizações são realizadas. Motivo que causa as diferenças nas coordenadas da origem deste o primeiro resultado.

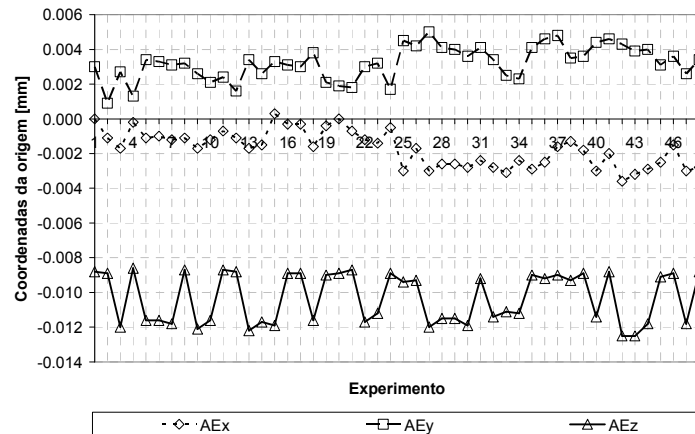


Figura 5. Medições sucessivas da coordenadas da origem na localização.

Finalmente, os resultados dos experimentos foram obtidos por uma análise de variância, de acordo com o exemplificado na Tabela 6 para a temperatura inicial ( $T_{ini}$ ). Na tabela tem-se à esquerda os fatores e suas interações, os resíduos, os graus de liberdade (GL), as somas e as médias quadráticas, o valor F calculado, o respectivo p-valor e o nível de significância em questão. Verifica-se que, neste caso, apenas o comprimento da ponta (L) se mostra significativo no nível de 0.001. Uma vez que comprimento da ponta (L) caracteriza os blocos, vide Tabela 2, neste caso, conforme esperado, nenhum dos fatores experimentais se mostram significativos na variação observada de  $T_{ini}$ .

Tabela 6 – Resultados da ANOVA para a temperatura inicial  $T_{ini}$ .

	GL	Soma Quadr.	Média Quadr.	Valor F	Pr(>F)	Significância
Bloco (L)	1	0.163333	0.163333	21.2409	4.267e-05	0.001
Dist	1	0.000833	0.000833	0.1084	0.7438	
Vel	1	0.003333	0.003333	0.4335	0.5142	
PCS	1	0.001524	0.001524	0.1982	0.6587	
Dist:Vel	1	0.002985	0.002985	0.3881	0.5369	
Dist:PCS	1	0.000541	0.000541	0.0704	0.7922	
Vel:PCS	1	0.002870	0.002870	0.3733	0.5448	
Dist:Vel:PCS	1	0.003854	0.003854	0.5012	0.4832	
Resíduos	39	0.299892	0.007690			

Para validar a aceitação da análise de variância o teste de normalidade de Shapiro-Wilk foi aplicado para cada variável resposta, fornecendo neste caso de  $T_{ini}$  o parâmetro  $W = 0.952$  e um p-valor de 0.04826 que leva à rejeição da

hipótese de normalidade dos resíduos. Quando outros fatores se mostram significativos executa-se ainda o Teste de Tukey para avaliar a significância da diferença das médias do nível do fator. Procedendo na forma discutida para toda a variável resposta do experimento, pode-se elaborar a síntese geral da análise de variância mostrada na Tabela 7 e discutida a seguir.

**Tabela 7 – Síntese geral da análise de variância.**

Variável Resposta	Testes		Fatores			Interações				
	Normalidade	Tukey	Dist	Vel	PCS	Dist:Vel	Dist:PCS	Vel:PCS	Dist:Vel:PCS	Resíduos
Tini										
Tfin										
AEx	✓	✓			✓					
AEy										
AEz		✓			✓					
EC1	✓									
EC2	✓									
EC3	✓									
CC1x	✓	✓			✓					
CC1y	✓									
CC2x		✓			✓					
CC2y	✓	✓								
CC3x		✓			✓					
CC3y	✓									
CS1x		✓			✓					
CS1y	✓	✓			✓					
CS1z		✓			✓					
VCC1	✓	✓			✓		✓			
VCC2		✓			✓					
VCC3	✓	✓					✓			
VCS1	✓	✓	✓							
DC1	✓	✓			✓					
DC2	✓	✓			✓					
DC3		✓			✓					
DS1	✓	✓			✓					
FCC1	✓									
FCC2		✓			✓					
FCC3	✓	✓								
FCS1	✓	✓			✓					
TCS1		✓			✓					

Verifica-se na coluna da esquerda, na Tabela 7 que as variáveis resposta do experimento (vide Tabela 4). As colunas dos testes estatísticos, especificamente os testes de Normalidade e de Tukey, indica quais resultados apresentaram normalidade dos resíduos e quais provocam variações significativas nas médias destas variáveis resposta (Tukey). Por exemplo, em  $AE_x$  verifica-se normalidade nos resíduos após análise de variância e significância nos níveis dos fatores que influenciaram  $AE_x$ . Nas demais colunas indicam-se quais fatores se mostraram significativos no nível de significância adotado, mostrando, neste caso, que apenas o PCS foi significativo na variação observada de  $AE_x$ .

O mais importante aspecto desta análise é a constatação que o PCS influencia significativamente a maioria dos testes, sendo ele o fator predominante no resultado observado. É também relevante observar que, excetuando o PCS como fator isolado, apenas a interação Dist: PCS aparece como significativa em duas situações, restando a distância de aproximação e recuo como o único fator significativo em apenas uma situação.



Além destes aspectos, resultados como  $AE_y$ , EC1, EC2, EC3, CC1<sub>y</sub>, CC2<sub>y</sub>, CC3<sub>y</sub>, FCC1 e FCC3 não mostraram sensibilidade significativa por nenhum dos fatores experimentais. No que se refere à circularidade, a não influência dos fatores era de certo modo esperada, porque esse parâmetro de forma é calculado como o resíduo de um ajuste matemático sobre todos os pontos que caracterizam a geometria medida.

Assim, assumindo que as combinações de fatores experimentais influenciam de modo equânime todos os pontos medidos na geometria, espera-se que não exista um fator com influência significativa sobre a circularidade calculada.

Já as coordenadas Y dos centros dos furos e da origem podem indicar um comportamento particular deste eixo da máquina, cabendo neste caso maiores investigações. Finalmente, os ângulos de azimute FCC1 e FCC3 são função das coordenadas Y dos centros dos respectivos furos, o que pode explicar a similaridade de comportamento na análise de variância.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados do experimento corroboram as evidências levantadas por simulação, que a localização dos pontos na definição do sistema de coordenadas da peça influencia significativamente os resultados da medição, mesmo frente a outros fatores potencialmente degradadores do desempenho quando não devidamente controlados. Esse fato é comprovado na medição da posição de geometrias, na sua dimensão, no posicionamento angular em relação a referências, além da própria localização da origem de coordenadas. Com base nestas evidências pode-se afirmar, agora com comprovação empírica, que as medições subseqüentes de uma peça serão no máximo tão boas quanto à localização da mesma no volume de trabalho.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem s à CAPES e à FAPESP pelo apoio concedido na realização deste projeto.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Abackerli, AJ, 2007, “Medição nas decisões sobre a usinagem: o problema da localização”. In. Anais do 12 Seminário de Alta Tecnologia: Inovações Tecnológicas na M@nufatura. Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, Piracicaba – SP, Outubro 2007, PP. 1-14.
- Brazhkin BS, Mirotvorskii VS., 2005, “Calculation of curved surfaces on coordinate measuring machines”. *Measurement Techniques*, Vol. 48, pp. 657-662.
- Capello E, Semeraro Q., 2000, “Harmonic fitting approach for plane geometry measurements”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 16, pp. 250-258.
- Capello E, Semeraro Q., 2001a, “The harmonic fitting method for the assessment of the substitute geometry estimate error. Part I: 2D and 3D theory”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, pp. 1071-1102.
- Capello E, Semeraro Q., 2001b “The harmonic fitting method for the assessment of the substitute geometry estimate error. Part II: statistical approach, machining process analysis and inspection plan optimization”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, pp. 1103-1129.
- Cho, MW.; Seo, TI., 2005, “Inspection Planning Strategy for the On-Machine Measurement Process Based on CAD/CAM/CAI Integration”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 19, pp. 607-617.
- Cruz, JAA; Raman, S, 2005, “Torus Form Inspection Using Coordinate Sampling”. *Transactions of the ASME*. Vol. 127, Vol. Feb., pp. 84-95.
- Elkott DF; Elmaraghy HA; Elmaraghy WH., 2002, “Automatic sampling for CMM inspection planning of free-form surfaces”. *International Journal of Production Research*, Vol. 40, pp. 2653-2676.
- Elkott DF; Veldhuis SC., 2005, “Isoparametric line sampling for the inspection planning of sculptured surfaces”. *Computer-Aided Design*, Vol. 37, pp. 189-200.
- Galetto M; Vezzetti E., 2006, “Reverse engineering of free-form surfaces: A methodology for threshold definition in selective sampling”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 1079-1086.
- Gao, CH, Cheng K, Webb D, 2004, “Investigation on sampling size optimization in gear tooth surface measurement using a CMM”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, pp. 599-606.
- Gou, JB; Chu, YX; Li, ZX, 1998, “On the symmetrical localization problem”. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, n. 4, pp. 533-540.
- ISO (Org.), 1995, *Guide to the Expression of uncertainty in measurement (GUM)*. 2. ed. Genève, Switzerland: International Organization for Standardization – ISO. (Guide).
- ISO (Org.), 2001, “Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM): Part 2: CMMs used for measuring size”. 2<sup>nd</sup> Ed. Genève, Switzerland: International Organization for Standardization – ISO. p. 11 (Geometrical Product Specifications – GPS). ISO 10360-2.
- Jiang BC, Chiu SD., 2002, Form tolerance-based measurement points determination with CMM. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 13, pp. 101-108.
- Kim, WS, Raman S, 2000, “On the selection of flatness measurement points in coordinate measuring machine inspection”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 427-243.

- Li YD; Gu PH., 2004, "Free-form surface inspection techniques state of the art review". Computer-Aided Design, Vol. 36, pp. 1395-1417.
- Li YF; Liu, ZG., 2003, "Method for determining the probing points for efficient measurement and reconstruction of freeform surfaces". Measurement Science and Technology, Vol. 14, pp. 1280-1288 .
- Montgomery, DC., 2005. "Design and Analysis of Experiments". 6<sup>th</sup> Edition, Willey & Sons. 680pp.
- Prakasvudhisarn C, Raman S., 2004, "Framework for Cone Feature Measurement Using Coordinate Measuring Machines". Journal of Manufacturing Science and Engineering Feb, Vol. 126, pp. 169-177.
- Samuel GL, Shunmugam MS., 2000, "Evaluation of circularity from coordinate and form data using computational geometric techniques". Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 24, pp. 251-263.
- Samuel GL, Shunmugam MS., 2002, "Evaluation of sphericity error from form data using computational geometric techniques". International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, pp. 405-416.
- Samuel GL, Shunmugam MS., 2003, "Evaluation of circularity and sphericity from coordinate measurement data". Journal of Materials Processing Technology, Vol. 139, pp. 90-95.
- Sansoni, G; Docchio, F, 2005, "In-field performance of an optical digitizer for the reverse engineering of free-form surfaces". Int J Adv Manuf Technol, Vol. 26, pp. 1353-1361.
- Smith TS; Farouki RT; Al-Kandari M; Pottmann H., 2002, "Optimal slicing of free-form surfaces". Computer Aided Geometric Design, Vol. 19, pp. 43-64.
- Spitz, SN, 1999, "The localization problem". In: Spitz, Steven Nadav. Dimensional inspection planning for coordinate measuring machines. Los Angeles, Ca: Faculty Of The Graduate School University Of Southern California, (PhD Thesis - Computer Science). 126p., pp. 111-113.
- Summerhays KD, Henke RP, Baldwin JM, et al., 2002, "Optimizing discrete point sample patterns and measurement data analysis on internal cylindrical surfaces with systematic form deviations". Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 26, pp. 105-121.
- Wilhelm, RG, Hocken, R, Schwenke, H. 2001. "Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement". Annals of the CIRP. 50/2:553-563.
- Xiong, Z; Wang, MY, 2004, "A Near-Optimal Probing Strategy for Workpiece Localization". IEEE Transactions on Robotics, Vol. 20, n. 4, pp. 668-676.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

# EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PART COORDINATE SYSTEM ON THE DIMENSIONAL EVALUATION OF GEOMETRIES

Alvaro José Abackerli, [abakerli@ipt.br](mailto:abakerli@ipt.br)<sup>1</sup>

Paulo Henrique Pereira, [pereira\\_paulo\\_h@cat.com](mailto:pereira_paulo_h@cat.com)<sup>2</sup>

Maria Célia de Oliveira Papa, [mcpopa@unimep.br](mailto:mcpopa@unimep.br)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Av. Prof. Almeida Prado 532, São Paulo – SP, 05508-901

<sup>2</sup>Caterpillar Inc., 100 Tractor Dr, East Peoria, IL 61630, USA

<sup>3</sup>Universidade Metodista de Piracicaba, Rod. Luis Ometto km 1, Santa Bárbara d'Oeste – SP, 13451-900

**Abstract.** *Coordinate measuring machines (CMMs) are utilized for geometric and dimensional control in manufacturing being responsible to furnish qualitative and quantitative information about the products. In general, the measurement process includes the probe qualification procedure, the establishment of part alignment or part coordinate system which define the part datums and, finally, the actual feature measurements. CMM measurement simulations show that incorrect definition of the coordinate system (datums) may increase the measurement uncertainty thus providing poorer information about the product quality. This problem is exacerbated when measuring free form surfaces when the point coordinates and the datums are the only details available to reverse engineer a given product. In this work, a given golden part containing common geometric features was used to show through experimentation the negative effect of poorly defined coordinate systems, even in relatively conventional situations. The results indicate that care is needed with the coordinate systems; otherwise measurements results can be seriously compromised.*

**Keywords:** *coordinate measurement, inspection, errors.*