

Avaliação de medição por coordenadas com apalpação óptica através de superfície de referência

André Roberto de Sousa, Gabriel Costa Sousa

Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Florianópolis
Laboratório de Metrologia

E-mail: asousa@ifsc.edu.br, gabrielcosta@ifsc.edu.br

Resumo. Sistemas de medição por coordenadas com apalpação óptica têm sido crescentemente aplicados em metrologia industrial, tanto em equipamentos de medição manuais como braços de medição e laser trackers, como em máquinas de medir tridimensionais CNC. Este trabalho descreve os procedimentos e resultados obtidos na realização prática da norma ISO10360-8 na avaliação de um sistema de medição por coordenadas com apalpação por triangulação laser, através da digitalização de uma superfície plana de referência. Os ensaios mostraram-se bastante práticos de execução e os resultados conclusivos e de fácil interpretação, sendo recomendados para verificações periódicas pelos usuários destes sistemas.

1. Introdução

Os sistemas de medição por coordenadas com apalpadores por triangulação laser têm sido cada vez mais empregados no controle dimensional de peças, notadamente na indústria de ferramentais de estampagem e injeção. Sua notável capacidade de geração de pontos em alta velocidade e em grande quantidade permite análises geométricas bastante ricas em toda a extensão da superfície medida. Em comparação com a medição por apalpação de contato, a velocidade de captura de pontos com a apalpação laser bem como a densidade de pontos obtida são significativamente maiores, motivando seu emprego crescente [1].

Estas vantagens encontram desafios metrológicos, dado que a incerteza da apalpação laser é maior quando comparada à apalpação mecânica, devido a fontes de incerteza como:

- Resolução limitada da câmera
- Influências de luminosidade ambiente e da reflexão da superfície medida
- Variação de foco no momento de captura dos pontos em máquinas manuais

Tais fontes de incerteza podem gerar erros de apalpação ocasionando a captura de pontos errados em relação à sua verdadeira posição na peça, e estes erros causam erros na reconstrução matemática do elemento medido, provocando erros de avaliação geométrica, como:

- Erros nas dimensões de elementos geométricos reconstruídos

- Erros de localização e orientação de elementos geométricos reconstruídos
- Distorções de forma nos elementos geométricos reconstruídos

Dado que a apalpação óptica tem especial aplicação na medição de superfícies (planas e com geometrias complexas), eventuais distorções de forma impactam muito na eficiência destes sistemas. Como os erros de forma impactam na avaliação de tolerâncias de orientação espacial (paralelismo, perpendicularidade e inclinação), possuem influência significativa no controle geométrico das peças.

Para orientar usuários e fabricantes na condução dos ensaios de avaliação de sistemas de medição por coordenadas com apalpação óptica existem as normas da série ISO10360 [2] em suas diversas partes, sendo a parte 8 dedicada para a avaliação de máquinas de medir por coordenadas com múltiplos sistemas de apalpação.

Neste trabalho esta norma foi utilizada para orientar procedimentos de ensaio empregados na avaliação de uma máquina de medir por coordenadas articulada (braço de medição) com apalpação por triangulação laser. Uma superfície plana de referência (desempeno) foi medida em uma máquina de medir por coordenadas para estabelecer um valor de referência para o seu desvio de planeza e, posteriormente, este mesmo plano foi medido repetidas vezes com o braço de medição com apalpação laser, buscando avaliar o erro de planeza do desempenho. A distorção da forma gerada pelo braço de medição foi empregada para inferir sobre a sua conformidade geométrica. O método mostrou-se bastante prático de aplicação e, embora o braço de medição empregado estivesse fora do seu intervalo de calibração, os erros encontrados estavam dentro da sua especificação de erro máximo.

2. Princípios e aplicações da apalpação por triangulação a laser na medição por coordenadas

O princípio de funcionamento da apalpação por triangulação laser é muito bem estabelecido e se fundamenta na reflexão de um feixe de luz incidente sobre a superfície a ser medida. O cabeçote de medição projeta um feixe de luz laser sobre a superfície a medir, e a linha gerada pelo reflexo desta projeção é capturada por um sensor de imagem no mesmo cabeçote. A informação da posição do ponto refletido no sensor de imagem do sistema é combinada com informações geométricas de posição e orientação do cabeçote de medição, permitindo calcular a localização do ponto iluminado de modo contínuo ao longo da trajetória de apalpação. Nos sensores atuais, para aumentar a velocidade e quantidade de pontos adquiridos, em vez de um feixe de luz pontual a peça é iluminada por um plano de luz, e o sensor de imagem captura a linha refletida da peça (figura 1).

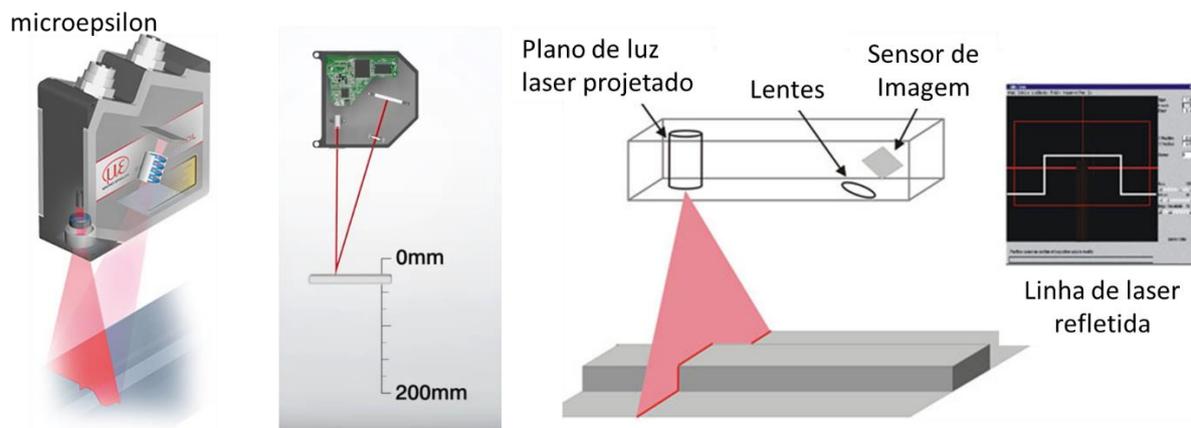


Figura 1 – Princípio do apalpador de medição por triangulação laser

Devido à velocidade na localização de pontos, estes apalpadores permitem alta velocidade de medição e alta quantidade de pontos e, assim, possibilitam alto detalhamento geométrico da superfície medida, além de não exercer força de medição sobre a peça. Essas habilidades ampliam o campo de atuação das máquinas de medir para aplicações como medição de peças flexíveis, engenharia reversa e controle de superfícies por comparação com o modelo CAD da peça. Máquinas de medir tridimensionais, braços de medição e *laser trackers*, por exemplo, possuem a opção de emprego destes tipos de apalpadores com crescente número de usuários.



Figura 2: Exemplos de sistemas de medição por coordenadas com apalpação por triangulação laser

Dada a limitação da medição óptica em acessar o interior de furos e cavidades de pequenas dimensões, a principal aplicação para quem busca este tipo de apalpador é a medição de superfícies. Assim, este apalpador é bastante usado no controle geométrico de peças estampadas, injetadas e fundidas, bem como a inspeção de cavidades de ferramentais e peças. A digitalização de peças para engenharia reversa, a inspeção de peças flexíveis e de peças com geometria complexa são aplicações frequentes para estes apalpadores (figura 3).



Figura 3 – Exemplos de aplicação da medição por coordenadas com apalpação por triangulação laser

3. Incerteza de medição por coordenadas por triangulação a laser

Na medição por coordenadas com apalpação por triangulação laser as principais fontes de incerteza são [3]:

- Erros do sistema de medição por coordenadas onde o apalpador está instalado
- Resolução limitada do sensor de imagem
- Refletividade da superfície iluminada dados pelo material, cor e tipo de acabamento da peça
- Variação da distância de medição em relação ao foco ideal da câmera (máquinas manuais)
- Incidência tangente da luz sobre a superfície, gerando um padrão de reflexão muito difuso
- Influências do ambiente, principalmente a temperatura e a luminosidade presente

Dado que as incertezas de apalpação óptica se unem às incertezas da máquina de medir em si, é esperado que a incerteza de medição resultante com a apalpação óptica seja superior à incerteza de medição com apalpação por contato mecânico. Como exemplo desse fato, uma máquina de medir por coordenadas CNC com um apalpador de contato com especificação de erro máximo (MPE – ISO10360-2) de $1,5 + L/300 \mu\text{m}$ passa para $9,5 + L/300 \mu\text{m}$ (L em mm), com apalpação por triangulação a laser.

Se não forem bem avaliadas e consideradas, estas fontes de incerteza potencializam problemas nas aplicações citadas no item 2. De modo geral, um requisito bastante importante na medição óptica é a fidelidade geométrica com que o sistema de medição é capaz de reproduzir a forma da superfície medida. Eventuais erros de medição irão gerar pontos com localização errada e a reconstrução geométrica da peça é comprometida, potencializando problemas de várias ordens nas aplicações citadas. Dado que os pontos medidos são comparados com o modelo CAD da peça, gera-se um diagnóstico errado sobre a magnitude assim como sobre a localização dos erros geométricos, levando a erros na correção dos processos. Na produção de ferramentais (moldes, estampos, etc.), esses erros podem ter consequências críticas, dado o alto valor agregado das peças e ao fato de serem peças unitárias.

Um outro problema em potencial diz respeito ao fator de escala da superfície medida. Nesse caso o sistema de medição por coordenadas com apalpação laser gera nuvens de pontos com localização errada, de modo que a peça reconstruída terá baixa distorção de forma, mas terá dimensões distintas da peça medida. O erro de escala é principalmente causado por desajustes na máquina de medir e por influência da temperatura sobre a peça e o sistema de medição. A figura 4 ilustra estes efeitos.

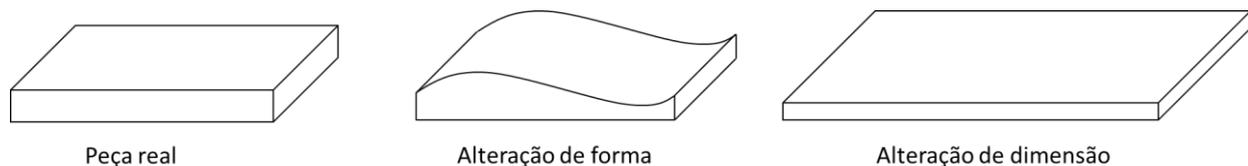


Figura 4 – Distorções de forma e erro de escala na medição óptica

4. Avaliação da distorção de forma

As principais normas de avaliação de sistemas de medição por coordenadas são a alemã VDI-VDE 2634 [4] e a ISO10360 parte 8 [2]. Ambas contemplam ensaios para avaliação da distorção de forma e do erro de escala citados. O erro de escala requer a medição de uma medida materializada com comprimento calibrado e, para a avaliação da distorção de forma as normas recomendam o emprego de uma superfície plana com desvio de planeza calibrado.

Para a realização da distorção de forma neste trabalho foi utilizado um desempenho de ferro fundido com dimensões de (200 x 300) mm, que foi medido em uma máquina de medir por coordenadas CNC (figura 5). Para esta medição foi definida uma estratégia de apalpação com 375 pontos distribuídos em formato de grade sobre o plano, mantendo uma distância de 5 mm das suas bordas de modo a minimizar possibilidade de aquisição de pontos em regiões próximas às bordas do desempenho. Sobre os pontos medidos foi aplicado um filtro gaussiano de 3 desvios-padrão e, após isso, os pontos restantes foram utilizados para a construção geométrica do plano e avaliação do desvio de planeza. Para a obtenção do desvio de planeza foi empregado o método de reconstrução geométrica de zona mínima [5].

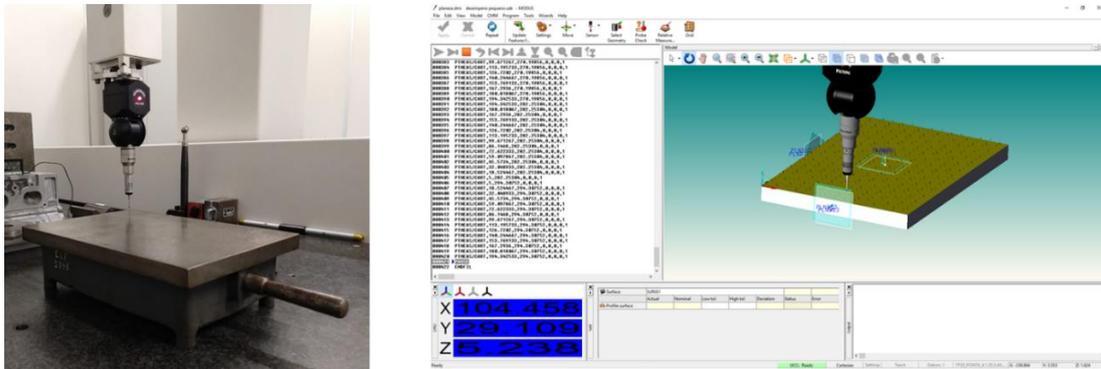


Figura 5: Procedimento de calibração do desvio de planeza da peça de referência

A tabela 1 mostra os resultados obtidos para o desvio de planeza. Para a estimativa da incerteza de medição foram consideradas a precisão da média de 05 resultados e a parcela de incerteza da máquina de medir. Para esta parcela foi considerada a parcela constante do erro máximo volumétrico da máquina (MPE), que é de 0,003 mm, dado que a superfície é plana e os pontos estão praticamente na mesma altura (eixo Z). Foi assumido que os erros de posição no deslocamento nos eixos X e Y da máquina possuem influência mínima sobre a medição de planeza.

Tabela 1: Desvio de planeza calibrado na peça de referência

Medição	1	2	3	4	5
Indicação	0,0192	0,0187	0,0191	0,0185	0,0193
Desvio de planeza estimado		0,019 ± 0,003 mm			

Este desempenho foi então medido 10 vezes em um braço de medição com o recurso de apalpação por triangulação laser. O número de pontos em cada medição variou entre 220 mil e 270 mil pontos. Para manter coerência com o procedimento de calibração, a área de avaliação foi mantida (eliminando borda de 5 mm), bem como a filtragem de pontos e método de reconstrução matemática. A figura 6 ilustra o ensaio e a tabela 2 traz os resultados.

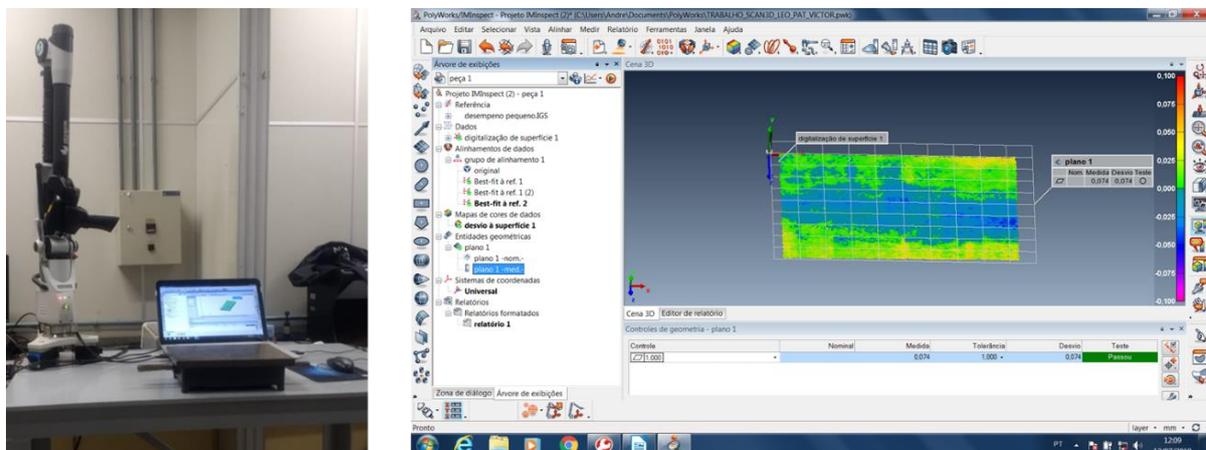


Figura 6 – Ensaio de avaliação da distorção de forma

Tabela 2: Resultados da medição do desvio de planeza com o braço de medição e apalpador óptico

Medição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Indicação	0,052	0,068	0,046	0,074	0,056	0,068	0,041	0,057	0,058	0,048
Desvio de planeza estimado					0,061 ± 0,041 mm					

Os ensaios foram bastante práticos e rápidos, sendo realizado em menos de 1 hora. Os resultados foram reveladores com respeito ao estado do sistema de medição. O braço de medição estava há bastante tempo sem calibração e os resultados encontrados atestaram a necessidade de manutenção, calibração e correção dos erros. Apesar dos resultados terem diferido bastante dos resultados obtidos na máquina de medir tridimensional (tendência de +0,043 mm), a precisão de $\pm 0,029$ mm está dentro do esperado para o sistema de apalpação laser. Calculando-se o erro normalizado para comparação dos resultados obteve-se um valor de 1,1 confirmando ser significativa a diferença entre os resultados.

5. Conclusões

O emprego de apalpação laser em sistemas de medição por coordenadas expande as possibilidades da tecnologia para a inspeção de superfícies, e tem sido crescentemente empregada em máquinas de medir por coordenadas, braços de medição e laser trackers. Para o asseguramento da confiabilidade metrológica dos sistemas de medição nesse modo de apalpação é importante a verificação periódica dos erros de medição seguindo métodos rastreados em normas internacionais. Os resultados do ensaio podem ser usados para indicar necessidade de manutenção e ajuste nos sistemas de medição e também para delimitar o campo de aplicação dos sistemas. O ensaio apresentado neste trabalho avaliou a distorção na forma de uma superfície plana calibrada para inferir sobre a exatidão de medição de um braço de medição com apalpação por triangulação a laser. O método mostrou-se prático e rápido de aplicação, tem um custo reduzido e foi revelador a respeito do estado do equipamento avaliado, que estava fora do seu intervalo de calibração. Apesar dos erros estarem acima do especificado para o equipamento, a parcela sistemática dos erros foi predominante em relação à parcela aleatória.

Referências

- [1] Sousa, A., Wojcikiewicz, G., Dutra Jr., L. Zirbes, C. Avaliação de incerteza em medição por coordenadas de superfícies complexas com apalpação laser. Anais do 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Joinville, SC, 2017.
- [2] ISO 10360-8:2013 Geometrical product specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) -- Part 8: CMMs with optical distance sensors.
- [3] Turley, G., Kiraci, E., Olifent, A., Attridge, A., Tiwari, M., Williams, M. Evaluation of a multi-sensor horizontal dual arm Coordinate Measuring Machine for automotive dimensional inspection. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI 10.1007/s00170-014-5737-3.
- [4] VDI/VDE 2617 Blatt 6.1 Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Koordinatenmessgeräte mit optischer Antastung - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit optischen Sensoren für laterale Strukturen.
- [5] ISO 12781-1:2011 Geometrical product specifications (GPS) — Flatness — Part 1: Vocabulary and parameters of flatness.