

AValiação DE INCERTEZA EM MEDIÇÃO POR COORDENADAS DE SUPERFÍCIES COMPLEXAS COM APALPAÇÃO LASER

André Roberto de Sousa, asousa@ifsc.edu.br
George Henry Wojcikiewicz, george@ifsc.edu.br
Lucas Arthur Dutra Junior, lj_dutra@yahoo.com.br
Christiano Fraga Zirbes, christianozirbes@hotmail.com

Instituto Federal de Santa Catarina. Av. Mauro Ramos, 950. 88020-300, Florianópolis, SC.

Resumo: Este artigo apresenta os resultados de ensaios de avaliação da exatidão de medição de um sistema de medição por coordenadas portátil (braço de medição) com apalpação laser no controle de peças com geometria regular e com superfície complexa. Ensaios foram planejados com base em normas VDI/VDE e ISO para reproduzir a condição de medição do sistema com apalpador de contato e com apalpador laser. Foram empregados como peças de referência um padrão tipo barra de esferas, uma superfície com baixo erro de planeza e uma cavidade de molde com geometria complexa. Estas peças foram previamente medidas em uma máquina de medição por coordenadas CNC para se ter valores calibrados para comparações e análises. O trabalho apresenta os métodos de teste e detalha os resultados e as análises.

Palavras-chave: Metrologia a laser, Medição por coordenadas

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de medição por coordenadas com apalpadores por triangulação laser têm sido cada vez mais empregados no controle dimensional de peças com superfície complexa, 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 o emprego crescente de apalpação óptica.

No entanto, se os processos de medição com apalpação laser possuem vantagens operacionais, por outro lado a incerteza de medição é normalmente maior do que na medição por contato. Fontes de influência ópticas tais como a cor e reflexividade da superfície medida, a profundidade de foco e a resolução da câmera, bem como influências de luminosidade ambientais, afetam os resultados na medição óptica, o que não ocorre na medição por contato. Dada essa condição, a confiabilidade da medição com apalpador laser pode limitar a sua aplicação a situações onde as tolerâncias são mais abertas. Pode também haver situações onde as fontes de incerteza estejam sob controle e a exatidão da medição ser adequada para peças mais precisas. Assim, é importante avaliar a incerteza da medição para não se limitar a utilização da tecnologia a um nível de exatidão abaixo do que ela é capaz, nem extrapolar sua utilização para situações em que a exatidão não permite.

Este artigo apresenta os resultados de ensaios de avaliação da exatidão de medição de um sistema de medição por coordenadas portátil (braço de medição) com apalpação laser no controle de uma peça com superfície complexa. Ensaios foram planejados para reproduzir a condição de medição do sistema com apalpador de contato e com apalpador laser em superfície que represente a cavidade de um molde de injeção de plástico. Esta peça foi previamente medida em uma máquina de medição por coordenadas CNC (Comando Numérico Computadorizado) para se ter uma peça de referência calibrada contra a qual as medições no braço de medição possam ser comparadas. O planejamento dos experimentos foi fundamentado em normas relativas à medição óptica [1, 2] e contempla várias repetições dos ensaios, de modo que ao final se possa avaliar a incerteza das medições nas condições de apalpação por contato e laser. Este artigo descreve o planejamento e a execução dos experimentos, bem como os resultados finais que permitirão delimitar o campo de aplicação do sistema para o controle de tolerâncias de perfil de superfície. Considera-se como a principal contribuição do trabalho a definição e colocação em prática de um roteiro experimental para que usuários dos sistemas de medição por apalpação laser possam empregar para avaliar a exatidão de seus sistemas e definir limites de aplicação realistas para os equipamentos. Além disso, o trabalho revela de modo prático a piora na exatidão dos resultados quando se trabalha com apalpação laser em relação à apalpação por contato, aspecto pouco demonstrado na prática, contrariando um senso comum na indústria de que a apalpação laser tem exatidão superior à apalpação por contato.

A partir da avaliação de peças com geometrias distintas (uma superfície plana, um padrão tipo barra de esferas e uma superfície complexa), foram avaliadas a exatidão apresentada na utilização do braço de medição, Figura 1. Como referência de medição foi utilizada uma MMC (Máquina de Medição por Coordenadas), na Figura 2 marca LK, modelo G80C atualizada tecnologicamente pela empresa Renishaw. Os ensaios planejados e executados não buscaram

comparar tecnologias ou modelos de equipamentos, mas sim desenvolver e aplicar um método de avaliação que possa ser usado de modo geral na investigação da incerteza de medição de sistemas de medição ópticos. Os resultados dos ensaios não podem ser extrapolados para qualquer situação de uso destes sistemas, mas para as situações encontradas durante os testes.



Figura 1. Sistema de Medição por Coordenadas portátil com apalpação por triangulação laser

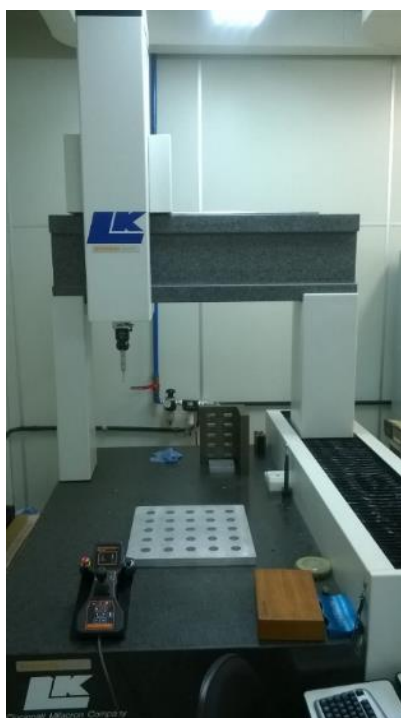


Figura 2. Máquina de Medição por Coordenadas empregada nos ensaios

2. SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE COORDENADAS COM APALPAÇÃO LASER

Os sistemas de medição por coordenadas com apalpação laser são normalmente utilizados para medições de superfícies complexas e com grandes dimensões. Como o desenvolvimento tecnológico dos últimos anos estes sistemas têm melhorado sua robustez operacional e exatidão, potencializando medições rápidas e confiáveis. Tem-se observado um aumento significativo na adoção deste método para a medição de superfícies, pois ele proporciona uma velocidade

de medição alta, número de pontos obtidos e possibilidade de geração de superfícies complexas, permitindo sua manipulação posterior por softwares CAD (Desenho Auxiliado por Computador).

O princípio de funcionamento destes sistemas é a reflexão de um feixe de luz (laser) sobre a superfície a ser medida. A partir do cabeçote de medição é projetado um feixe de laser sobre a superfície a medir, e o reflexo a esta projeção é capturado por sensores de imagem no mesmo cabeçote. O formato da linha refletida nesta triangulação combinada com informações geométricas do cabeçote de medição permite calcular as dimensões da peça. Consegue-se com este método uma alta velocidade de medição e alta densidade de pontos capturados, além da vantagem de medição sem contato.

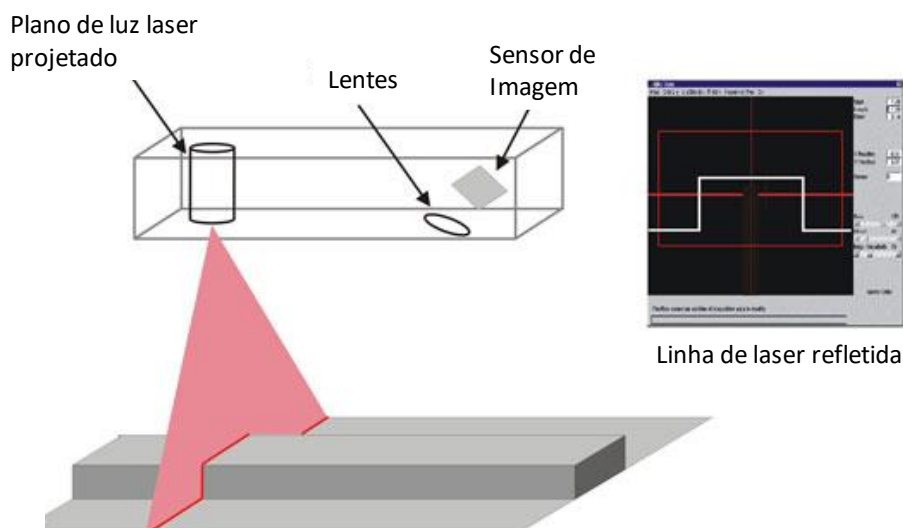


Figura 3. Princípio da triangulação laser

Devido suas grandes potencialidades técnicas, há em curso uma rápida disseminação destes sistemas de medição no mercado. Como exemplo disto, relatório de pesquisa de mercado “Metrology Services Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, and Forecast 2012 - 2018” [3], indica que o mercado de maior crescimento no oferecimento de serviços de metrologia, entre 2012 e 2018, será o de ODS (Digitalizadores Ópticos e Scanner) com uma previsão de crescimento, no período, de cerca de 8,9%, sendo a demanda por scanners laser a principal responsável, pelo oferecimento de tecnologia de medição de geometrias complexas com boa precisão. Os scanners laser representavam um percentual de 35,1% do mercado total de dispositivos ODS em 2012.

3. PROPOSTA E APLICAÇÃO DE MÉTODO PARA AVALIAR EXATIDÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO COM LASER

O planejamento dos experimentos foi definido de modo a avaliar os sistemas de medição às condições previstas na norma alemã VDI-VDE 2617 e na norma ISO 10360-9. Para isto foram previstos ensaios empregando distintos métodos e procedimentos, a saber:

- Para avaliação da exatidão de medição volumétrica, foi empregada uma barra de esferas calibrada previamente em uma máquina de medição por coordenadas. A calibração desta barra na MMC foi realizada por comparação com um padrão dimensional, resultando em uma incerteza de medição de $\pm 2 \mu\text{m}$. Na avaliação do braço de medição estas duas esferas foram medidas e a distância entre os seus centros no espaço foi calculada e comparada com o valor de referência calibrado.
- Para avaliar a confiabilidade metrológica do sistema de medição com apalpação laser em digitalizar e medir uma superfície de referência, foi empregada uma superfície na forma de um desempenho de ferro fundido rasquetado, com baixo erro de forma. Este desempenho foi medido previamente na MMC para se ter o erro de planeza determinado com menor incerteza de medição. Na medição com o braço de medição (apalpação com e sem contato) foi avaliado o erro de planeza.

- Após a avaliação da exatidão volumétrica e do ensaio com o desempenho, foi avaliada a exatidão do sistema de medição com apalpação laser em medir uma superfície com geometria complexa. Esta superfície foi previamente medida na MMC avaliando-se o erro de perfil de superfície obtido ao comparar a nuvem de pontos apalpada com o modelo CAD desta peça. Este mesmo procedimento de medição foi repetido com a apalpação laser e o erro de perfil de superfície foi também calculado. Como objeto de referência empregou-se uma peça que representa o molde de injeção de plástico de um recipiente.

O arranjo experimental pode ser melhor entendido com o auxílio da Figura 4.



Figura 4. Arranjo experimental empregado na avaliação.

3.1. Procedimentos de preparação e execução empregados nas medições

Visando obter melhor confiabilidade do processo de medição foram adotados alguns procedimentos utilizados em comum em todas as medições, procurando padronizar o método de teste:

- Limpeza das peças, adotado para evitar contaminação dos resultados por eventuais impurezas nas superfícies das peças de metal (desempeno e barra de esferas), tais como poeira e gordura, advindos de manipulação ou do próprio ambiente;
- Medição da temperatura durante os ensaios, visando avaliar o efeito de dilatação térmica sobre os resultados;
- Forma de fixação da peça durante as medições;
- Alinhamento matemático da peça;
- Emprego de modelo CAD em todas as medições.

3.2. Medição do comprimento da barra de esferas

Para a realização desta medição foi utilizada uma peça composta de um eixo de aço com duas esferas retificadas nas extremidades, com dimensões calibradas (Figura 5).

O procedimento de medição por apalpação por contato na MMC e por apalpação no Braço Portátil foram os mesmos, sendo apalpados 10 pontos em cada esfera. Ao longo da medição pela MMC, a temperatura da sala manteve-se entre 19 e 21°C. Para a medição com apalpação laser as esferas foram apalpadas em toda a sua superfície. A nuvem de pontos média foi comparada ao modelo CAD da barra, permitindo-se determinar a distância entre os centros das esferas. Ao longo da medição a temperatura da sala manteve-se entre 19 e 21°C. A reflexividade das esferas não causou saturação do sensor de imagem, de modo que as mesmas foram medidas sem nenhuma preparação superficial.



Figura 5. Avaliação da exatidão de medição dimensional com barra de esferas

Na medição da distância entre os centros das duas esferas foram obtidos os seguintes resultados para cada um dos procedimentos. A tabela 1 mostra as indicações obtidas pelos 3 sistemas de medição. Ressalta-se que a indicação na máquina de medição por coordenadas foi obtida por comparação com um padrão linear, aplicando-se o método da substituição. Na estimativa da incerteza de medição foram consideradas como fonte de incerteza a Repetibilidade das indicações, a incerteza da máquina de medir, a incerteza do coeficiente de expansão térmica do material e a incerteza dos termômetros empregados no monitoramento do laboratório de metrologia. Na medição com o braço de medição foi adicionada ainda a incerteza da barra calibrada na MMC.

Tabela 1. Comparação dos resultados na medição de comprimento.

Sistema de medição	Medição	
	Indicação média [mm]	Incerteza [mm]
Máquina de medir por coordenadas	365,550	0,003
Braço de medição com apalpação por contato	365,565	0,055
Braço de medição com apalpação laser	365,499	0,088

Nos testes realizados com a barra de esferas determinou-se que a apalpação laser incrementou em cerca de 30 μm a incerteza de medição. Ao analisar os pontos individualmente em cada esfera percebe-se uma dispersão nos pontos medidos superior a estes 30 μm , mas como o mensurando em questão é a distância entre os centros das esferas, e estes centros são obtidos por ajuste matemático (método dos mínimos quadrados), os erros aleatórios são minimizados pela grande quantidade de pontos empregada no ajuste matemático. A tendência dos resultados com apalpação laser foi inferior à tendência com a apalpação por contato. O ensaio mostrou-se bastante prático de aplicação e os resultados indicaram a conformidade deste modelo de braço de medição com suas especificações de catálogo.

3.3. Medição da superfície plana

Para avaliar a capacidade do sistema de medição com apalpação laser em reproduzir com fidelidade uma forma geométrica regular, foi medida uma superfície plana com baixo erro de forma, sendo empregado um desempenho de precisão rasqueteado (Figura 6).



Figura 6. Avaliação da exatidão de medição de forma na MMC e no Braço de Medição com apalpação laser

Na caracterização da planeza do desempenho na MMC, foram apalpados 100 pontos distribuídos em formato de grade de 10 linhas por 10 colunas. A partir dos pontos capturados foi ajustado matematicamente um plano (método de zona mínima) e determinado o erro de planeza deste desempenho. O procedimento foi repetido 5 vezes e ao longo das medições a temperatura da sala manteve-se entre 19 e 21°C. Após a medição na MMC o desempenho foi levado até o braço de medição e medido também por apalpação de contato. Procurou-se manter o mesmo procedimento empregado na MMC. No entanto, dada a característica de operação manual, a localização dos pontos sobre o desempenho não foi a mesma da medição CNC na MMC. O procedimento foi repetido 5 vezes e ao longo das medições a temperatura da sala manteve-se também entre 19 e 21°C.

Após a medição por contato, no mesmo braço de medição foi realizada a medição do desempenho com a apalpação laser. Nesta medição foi realizado o escaneamento da superfície direcionando o feixe de laser o mais próximo possível da posição focal ótima do sensor de imagem. Esta posição é auxiliada pela projeção de um ponto de laser sobre a peça de modo que o operador possa tentar fazer coincidir este ponto sobre a linha de laser. O procedimento foi repetido 5 vezes e, ao longo das medições, a temperatura da sala manteve-se entre 19 e 21°C. A nuvem de pontos capturada foi empregada para ajustar matematicamente um plano (método de zona mínima) e neste plano se avaliou o erro de planeza.

Seguindo-se este procedimento os resultados encontrados podem ser vistos na tabela 2 a seguir. Na estimativa da incerteza de medição foram consideradas como fonte de incerteza a Repetibilidade das indicações, a incerteza da máquina de medir, a incerteza do coeficiente de expansão térmica do material e a incerteza dos termômetros empregados no monitoramento do laboratório de metrologia. Na medição com o braço de medição foi considerada também a incerteza da indicação do plano calibrado na MMC.

Tabela 2. Comparação dos resultados na medição de plano.

Sistema de medição	Medição	
	Indicação média [mm]	Incerteza [mm]
Máquina de medir por coordenadas	0,029	0,003
Braço de medição com apalpação por contato	0,017	0,010
Braço de medição com apalpação laser	0,150	0,050

Dos resultados encontrados observa-se que os resultados encontrados na apalpação por contato não foram compatíveis com o resultado da MMC pois o erro normalizado ficou superior a 1,0. Houve também uma diferença significativa na exatidão do braço de medição com apalpação por contato em relação à apalpação laser, onde uma fonte de incerteza é a impossibilidade de manter o foco dentro da distância ideal. Como não foi aplicado nenhum filtro matemático, o erro de planeza fica muito sensível à incerteza de apalpação pois todos os pontos são empregados no cálculo do erro de forma (métodos de zona mínima). Na medição com apalpação laser foram adquiridos mais de 300000

pontos. Apesar dessas diferenças importantes, os resultados mostraram mais uma vez a conformidade dos sistemas de medição frente suas especificações de catálogo.

3.4. Medição de peça com geometria complexa

Para avaliar a exatidão da apalpação laser em medir uma superfície não plana, escolheu-se uma superfície complexa produzida por meio de usinagem CNC a partir de processo CAD/CAM. Esta superfície foi previamente medida na MMC avaliando-se o erro de perfil de superfície obtido ao comparar a nuvem de pontos apalpada com o modelo CAD desta peça. Nesta avaliação empregou-se o recurso de melhor ajuste (best fit) do software de medição da MMC, destravando-se todos os graus de liberdade do alinhamento matemático, de modo que o parâmetro calculado de erro de perfil de superfície avalia o erro de forma apenas da superfície real em relação à superfície nominal (CAD). Este mesmo procedimento de medição e de processamento foi repetido com a apalpação laser e o erro de perfil de superfície foi também calculado. Como objeto de referência empregou-se uma peça que representa o molde de injeção de plástico de um recipiente, a qual possui superfícies com curvatura variável e vetores normais em quase todas as direções.

Na programação da MMC foi utilizado o modelo em CAD para definição seleção dos locais a serem medidos, sendo definida uma grade de 10 linhas por 10 colunas totalizando 100 pontos apalpados sobre as superfícies complexas. Ao longo da medição a temperatura da sala manteve-se entre 19 e 21°C. Este ensaio não foi realizado com o braço de medição em modo de apalpação por contato pela dificuldade em localizar os pontos sobre as superfícies complexas nas mesmas posições programadas na MMC.

No braço de medição com apalpação laser, foram capturados mais de 160000 pontos sobre as superfícies da cavidade, e com estes foi calculado o erro de perfil de superfície aplicando o mesmo ajuste matemático (best fit com todos os graus de liberdade destravados) de modo que a indicação da medição representa a fidelidade de forma da superfície medida em relação ao modelo CAD.

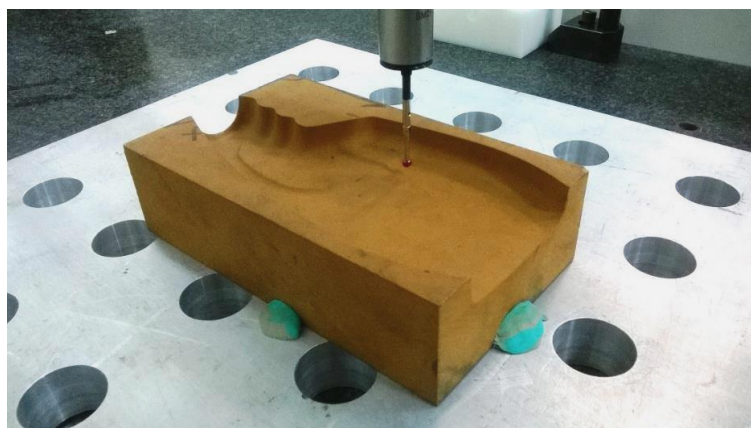


Figura 7. Peça com cavidade de geometria complexa

Para estas medições, os resultados do erro de perfil de superfície podem ser vistos na tabela 3 a seguir. Nesta análise de incerteza o procedimento adotado foi diferente dos ensaios anteriores. Dada a dificuldade de considerar as componentes de incerteza da máquina e do ambiente de medição na determinação do erro de perfil de superfície numa forma complexa, foi considerada como fonte de incerteza em cada avaliação apenas a repetibilidade das indicações (componente Tipo A).

Tabela 3. Comparação dos resultados na medição de superfície complexa

Sistema de medição	Medição	
	Erro de perfil de superfície [mm]	Incerteza [mm]
Máquina de medição por coordenadas	0,358	0,010
Braço de medição com apalpação laser	0,461	0,085

Nesta avaliação houve a maior diferença entre a MMC e o braço de medição com apalpador laser, com erro normalizado acima de 1,0. Para esta diferença contribuiu o fato de que são métodos distintos para a avaliação de uma superfície com curvatura bastante pronunciada. Os pontos apalpados com a medição na MMC não foram os mesmos medidos com o laser e isso faz com que o erro de perfil de superfície seja calculado com base em comparações de nuvens de pontos distintas. No ensaio de planeza isto não foi crítico pois a superfície possui uma geometria elementar com baixo erro de forma. No caso da superfície complexa isso é bastante diferente. Para uma comparação mais fiel o ensaio deveria ser realizado com a determinação dos mesmos pontos marcados na peça, e esta recomendação deverá ser tentada em trabalhos futuros.

4. CONCLUSÕES

Os ensaios comparando uma máquina de medir por coordenadas e um braço de medição com apalpação por contato e por apalpação laser permitiram verificar vantagens e desafios em ambos os sistemas. O braço de medição apresenta-se vantajoso operacionalmente, especialmente com a apalpação laser, pela rapidez e enorme densidade de pontos. No entanto, a incerteza de medição com a medição laser foi sempre maior do que da medição com máquina de medir por coordenadas e com a medição com o mesmo braço de medição com apalpação por contato. Os erros encontrados pelo braço de medição estão dentro de suas especificações.

A barra de esferas é útil para avaliar o erro volumétrico dos sistemas de medição mas para avaliar a capacidade do braço de medição com apalpador laser em reproduzir com fidelidade uma forma geométrica, a superfície plana e a superfície complexa são mais efetivos. A estimativa de incerteza de medição com a superfície plana é mais rica de informações por ser mais fácil considerar fontes de incerteza nas análises. É mais prático obter uma superfície plana de referência do que uma superfície complexa de referência.

De modo geral verificou-se que a medição com apalpação laser requer um cuidadoso procedimento de orientação do apalpador por triangulação em relação à superfície da peça, além de requerer uma boa experiência do operador quanto à distância focal ótima da óptica do apalpador. Além da habilidade na operação de medição também é muito importante que o operador seja proficiente na exploração de recursos de manipulação e tratamento de nuvens de pontos geradas com a apalpação laser. A forma de “costurar” os pontos de distintas passagens do laser sobre a peça e filtrar os resultados possui influência significativa sobre os resultados.

Os métodos de teste aqui avaliados mostraram-se práticos e rápidos de aplicação, com a capacidade de revelar informações metrológicas importantes para se inferir sobre a exatidão das medições. Os sistemas de medição com apalpação laser têm sido cada vez mais empregados na qualificação de produtos e processos nas empresas, e é muito importante que se disponham de métodos para avaliar a sua incerteza de medição de modo a validá-lo para a aplicação pretendida, e mesmo definir o seu escopo de atuação. A medição com laser possui vantagens operacionais imensas sobre a apalpação por contato, sendo bastante promissora. No entanto, é necessário considerar que a medição óptica possui fontes de incerteza em maior número em relação à medição por contato. A cor da peça, sua textura superficial, sua reflexividade, a luminosidade ambiente e a profundidade focal, são algumas destas fontes de incerteza que precisam ser bem controladas para que a medição óptica com apalpação laser possa expandir os seus limites de aplicação e aproveitar melhor as enormes vantagens operacionais em relação à medição por contato.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao IFSC Campus Florianópolis pelo apoio a pesquisa e pela disponibilidade da sua infraestrutura laboratorial necessária para a realização dos ensaios.

6. REFERÊNCIAS

- [1] ISO 10360-9:2013 Geometrical product specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS) - Part 9: CMMs with multiple probing systems
- [2] 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

[3] Relatório de Pesquisa de Mercado. Disponível em <https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=54735>
Acessado em Dezembro de 2016.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

UNCERTAINTY EVALUATION OF COORDINATE MEASURING SYSTEMS WITH LASER PROBING

André Roberto de Sousa, asousa@ifsc.edu.br
George Henry Wojcikiewicz, george@ifsc.edu.br
Lucas Arthur Dutra Junior, lj_dutra@yahoo.com.br
Christiano Fraga Zirbes, christianozirbes@hotmail.com

Federal Institute of Santa Catarina. Av. Mauro Ramos, 950. 88020-300, Florianópolis, SC, Brazil.

Abstract: *This paper presents the results of tests executed to evaluate the accuracy of a portable coordinate measuring system (measuring arm) with laser probing in the control of parts with regular and complex geometries. Tests were planned based on VDI/VDE and ISO standards to reproduce the measuring condition of the system with touch probe and laser probe. A ball bar, a precision flat surface and a cavity with complex geometry were used as reference parts. These pieces were previously measured in a CNC coordinate measuring machine to have calibrated values for comparisons and analyzes. The paper presents the test methods and details the results and analyzes.*

Keywords: *Laser metrology, Coordinate metrology, laser probing*

The authors are the only responsible for the content of the printed material presented in this work.