

# Comparação de Medições por Coordenadas Utilizando um Sistema de Fotogrametria e uma Máquina 3D.

Bolívar Landeta, Ricardo Sutério

Instituto Tecnológico de Aeronáutica. End.: Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias, CEP 12.228-900 – São José dos Campos – SP – Brasil

**Resumo** — Tanto o sistema de medição por coordenadas 3D como o sistema de fotogrametria oferecem grandes vantagens de uso sobre outros sistemas de medição por coordenadas, especialmente os relacionados no quesito exatidão e em especial à capacidade de medir coordenadas de corpos de geometria complexa. O equipamento de fotogrametria estudado neste trabalho, embora tenha como principal uso realizar medidas dimensionais dinâmicas, tais como calibração de robôs industriais, a sua aplicação no Brasil encontra-se numa fase embrionária. Este trabalho busca comparar as técnicas de medição de cada sistema com a finalidade de avaliar suas exatidões dentro de um volume pré-estabelecido, assim como conhecer as vantagens e desvantagens da nova tecnologia fotogramétrica com aplicação na calibração de robôs que futuramente serão utilizados em um processo de montagem automatizado de grandes volumes. Para tanto com relação aos sistemas mencionados serão considerados os seguintes fatores: facilidade de uso, adequação, dos procedimentos de medição, prováveis restrições, tempo para realização de uma tarefa específica, incertezas envolvidas e confiabilidade metrológica.

**Palavras-chaves** — fotogrametria, sistema de medição, medição por coordenadas.

## I. INTRODUÇÃO

Atualmente a execução de medições precisa de equipamentos que ofereçam uma maior versatilidade no uso, e principalmente que tenham uma boa exatidão. Assim, embora tanto o sistema de fotogrametria, como de medição por coordenadas possuam diferentes aplicações específicas, além de vantagens e desvantagens próprias de cada um deles, estes têm a mesma resolução de micrometros.

No presente trabalho foram realizadas medições utilizando os dois sistemas mencionados, para uma mesma peça, para então compará-los. A seguir, explica-se brevemente o funcionamento de cada um destes sistemas.

Bolívar Landeta, bolivar@ita.br, Tel +55-12-39476948, Ricardo Sutério, suterio@ita.br, Tel +55-12-39457232,

## 2. FUNCIONAMENTO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO.

### 2.1. Sistema de medição por fotogrametria.

O sistema de medição por fotogrametria, chamado às vezes de videogrametria, possui câmeras infravermelhas que determinam a posição de pontos num espaço tridimensional, estes pontos são identificados através de leds instalados no mensurando, ou pela movimentação de um apalpador equipado com os leds que ao tocar pontos de uma superfície registra a posição destes pontos no espaço. Tanto para os leds como para o apalpador, cada câmera filtra o sinal vertical ou horizontal do led e calcula a posição cartesiana do ponto, como é mostrado na Fig. 1. Caso seja necessário calcular a orientação do mensurando, pode-se instalar um arranjo com três leds, criando assim um plano.

O dispositivo que contem as câmeras e os leds, pode ser manuseado tanto por um operador quanto por um robô. É importante que este manuseio possua uma exatidão próxima a do sistema de medição para que esta importante característica deste sistema possa ser aproveitada.

O apalpador é removível, e varia de tamanho conforme a utilização, porém a grande vantagem deste sistema é sua mobilidade. Na Fig. 2 é possível ver um sistema de medição fotogramétrico do tipo “K-series”, ao lado do sistema de tratamento de sinais. O sistema utilizado neste trabalho é o modelo K-610 do fabricante Metris, e possui três câmeras para a leitura dos pontos no espaço de medição.

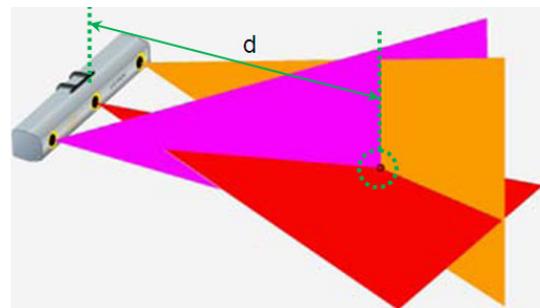


Fig. 1. Identificação de um ponto através da câmera.



Fig. 2. Sistema K-series.

## 2.2. Sistema de medição de uma máquina 3D.

Conhecida como a MMC (Máquina de Medir Coordenadas,) dentro de um volume definido de trabalho, este sistema determina as coordenadas de pontos sobre um mensurando em relação a outro ponto de referência; o que serve de base para a determinação dos parâmetros de elementos geométricos, tais como: dimensão, forma e posição.

O localizador é parte deste sistema, e é de vital importância na determinação destas coordenadas, este pode operar com ou sem contato com o mensurando. Os localizadores sem contato identificam o ponto com base num sistema óptico de projetor de perfil ou microscópio com cruz reticulada, tais sistemas ópticos têm sido substituídos por câmeras digitais e processamento computadorizado de imagens, enquanto os mais modernos de tipo óptico estão baseados em um feixe laser e método de medição por triangulação. Associados a dispositivos articulados de posicionamento, estes localizadores permitem medir, sem contato, superfícies com forma irregular.

Os localizadores com contato podem ser rígidos, apresentando diferentes configurações do sensor, em função da característica do ponto a ser localizado no mensurando, ou pode ser articulado, sendo a localização do ponto de medida relacionada à geração de um sinal elétrico. Estes são conhecidos como apalpadores. Na Fig. 3 apresenta-se a MMC utilizada no presente trabalho, modelo CRYSTA-APEX C 7106 do fabricante Mitutoyo.

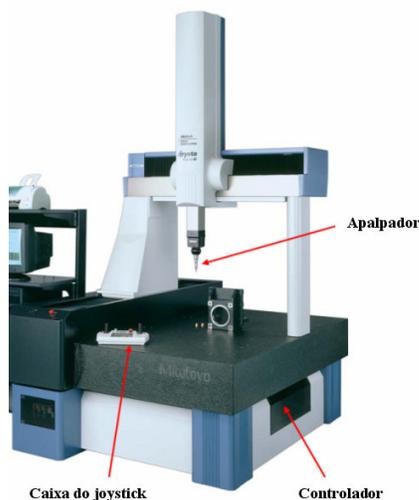


Fig. 3. Máquina de Medir Coordenadas.

## 3. CONSIDERAÇÕES INICIAS DO EXPERIMENTO.

Embora o sistema fotogramétrico K-series esteja desenhado para trabalhar nas faixas de temperatura e umidade de 10°C - 35°C e 0% - 80%, respectivamente segundo o manual da Metris, o ambiente de trabalho considerado para os experimentos foi aquele de uso da MMC da MITUTOYO (temperatura: 20°C ± 1°C, umidade: 55% ~ 65%). Isto deve-se às restrições na movimentação de todo o conjunto do equipamento da MMC, comparada com a maior versatilidade que oferece o sistema fotogramétrico K-series, tanto na sua movimentação como no seu uso nas variações de temperatura em ambientes industriais.

Antes de realizar as medições com o sistema K-series, considera-se um tempo de estabilização da temperatura nas câmeras de duas horas [2].

Com relação ao mensurando, utiliza-se o mesmo corpo de prova nos dois sistemas, este corpo é uma estrutura simples de aço estrutural ASTM-A-500 que tem eixos, cuja ortogonalidade é conferida com estes sistemas de medição. Este corpo de prova pode ser visto na Fig. 4, e constitui uma ferramenta para a calibração do posicionamento de um robô (no presente caso o robô KUKA KR-500), através do controle adaptativo com o uso de sensores do sistema de fotogrametria K-series, colocados sobre estes eixos, contudo, no presente trabalho, a utilização deste sistema está apenas direcionada a medição de ângulos entre os eixos do corpo de prova.

Para a medição dos cinco ângulos que possui a ferramenta, usando os dois sistemas de forma independente, são utilizados pontas de apalpadores de 5 mm para o K-series, e de 3 mm para o MMC. Devido às restrições de espaço e tempo para a montagem do sistema de medição K-series num ambiente em que opera a MMC, realiza-se uma só medida de cada ângulo com este sistema K-series, por tanto, também uma só medida é realizada com o sistema MMC.

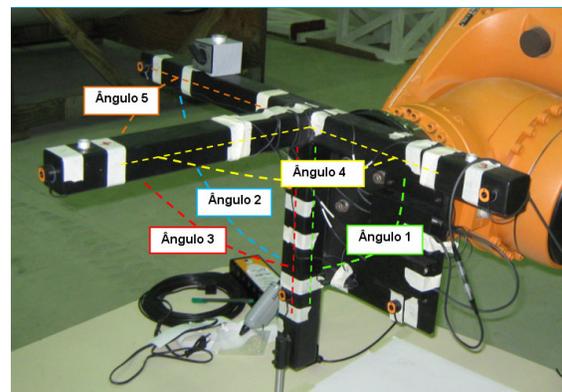


Fig. 4. Ângulos da Ferramenta Ortogonal.

## 4. DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO.

### 4.1. Medições com o sistema MMC.

Com o joystick próprio deste sistema, movimenta-se o apalpador até que sua ponta faça contato com a superfície da ferramenta, este contato aciona os sensores do apalpador e com a ajuda de transdutores, o sinal é enviado ao controlador do sistema, e este encaminha ao software correspondente, que

serve de interface entre o operador e a máquina de medir por coordenadas. Este software expressa o sinal original na forma de coordenadas do ponto de contato em relação a um sistema de referências previamente configurado.

Para gerar uma linha, precisa-se pelo menos de dois pontos, por tanto, realizando linhas paralelas aos planos ortogonais, mede-se o ângulo gerado entre estas duas linhas, como visto na Fig. 5. As medidas dos cinco ângulos gerados encontram-se na Tabela 1.

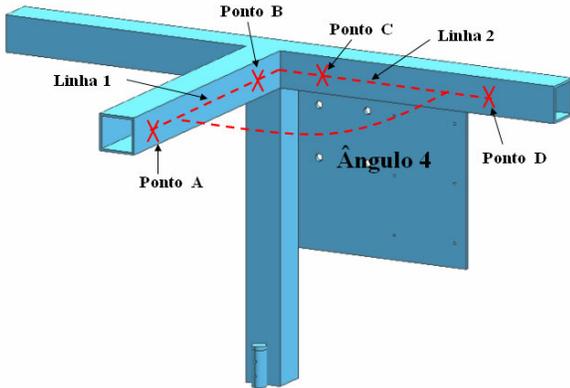


Fig. 5. Planos, linhas e ângulos utilizando a Máquina de Medir Coordenadas.

#### 4.2. Medições com o sistema Fotogramétrico.

Utilizando o mesmo princípio usado na MMC de pontos, linhas e planos, com a movimentação do apalpador sobre a superfície do corpo de prova, tomam-se linhas em cada superfície e com a ajuda do software respectivo estas projetam-se ao plano ortogonal seguinte (ver Fig. 6) para conseguir linhas completamente paralelas aos planos entre os quais se geram os ângulos. Já que a diferença do apalpador da MMC, no sistema fotogramétrico, este deve ser movimentado em forma manual, o qual não permite conseguir diretamente linhas paralelas aos planos, por tanto, utilizam-se estas novas linhas projetadas. As medidas dos cinco ângulos gerados encontram-se também na Tabela 1.

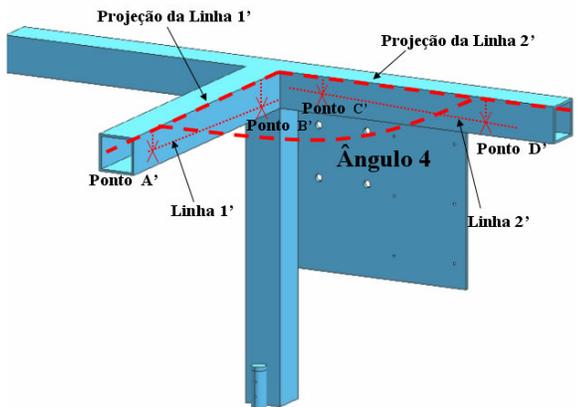


Fig. 6. Planos, linhas e ângulos utilizando o sistema fotogramétrico.

TABELA 1. MEDIÇÕES ANGULARES DOS DOIS SISTEMAS DE MEDIÇÃO.

| Ângulo | Sistema MMC | Sistema Fotogramétrico | Desvio <sup>(1)</sup> |
|--------|-------------|------------------------|-----------------------|
| 1      | 89.831°     | 89.833°                | 0.002°                |
| 2      | 90.419°     | 89.552°                | 0.867°                |
| 3      | 90.158°     | 89.918°                | 0.240°                |
| 4      | 90.117°     | 89.913°                | 0.204°                |
| 5      | 89.908°     | 89.855°                | 0.053°                |

<sup>(1)</sup>: Valor Absoluto

#### 4.3. Considerações das Incertezas envolvidas.

Ambos os sistemas têm seus próprios valores de exatidão, e estes valores, por exemplo, no caso da MMC estão em função das dimensões do mensurando, e no sistema fotogramétrico em função da distancia de posicionamento do mensurando à câmera. Considerando um nível de confiança de  $\pm 2 \sigma$  (95%) tem-se os seguintes valores:

Para o sistema MMC:

$$MEP_{MMC} = (1.9 + 3L/1000)um \quad (1)$$

MEP = Máximo erro permissível.

Em todos os ângulos formados pelos eixos da ferramenta ortogonal, o comprimento destes “L = 400 mm” é considerado o mesmo, Por tanto:

$$MEP_{MMC} = 3.1 um \quad L = 400 mm$$

Para encontrar a incerteza da medição angular, utiliza se a função trigonométrica da tangente:

$$U_{\theta} = tg^{-1} \left( \frac{MEP_{MMC}}{L} \right) \quad (2)$$

$$U_{\theta_{MMC}} = 0.444^{\circ}$$

Para o sistema fotogramétrico:

O equipamento K-series utilizado possui três zonas no seu volume de trabalho, e as medidas realizadas foram executadas na segunda zona que tem uma exatidão de 45  $\mu m$ , como indica o manual da METRIS [8].

Neste sistema, a grande diferença com relação ao sistema MMC, é que a incerteza da medição angular está relacionada com a distancia “d” da câmera à posição do mensurando (Ver Fig. 1.)

$$MPE_{FOTOG.} = 45 um \quad d = 5000 mm$$

Aplicando a (2) e ao substituir a distancia “d” pelo lado “L” , a incerteza é:

$$U_{\theta_{FOTOG.}} = 0.515^{\circ}$$

4.4. Conformidade das medições.

Da Tab. 1, considera-se as medições realizadas pela MMC como referencia “Mref” na (3) para determinar o Erro Normalizado (En).

$$E_n = \frac{|M_{ref} - M|}{\sqrt{U_{\theta MMC}^2 + U_{\theta FOTOG.}^2}} \quad (3)$$

As medições estão conformes desde que cumpram a relação  $En \leq 1$ . Na Tabela 2 expressam-se estas conformidades.

TABELA 2. CUMPRIMENTO DAS MEDIÇÕES ANGULARES DO SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO.

| Âng. | Sistema MMC      | Sistema Fotogramétrico | Desvio (1) | Erro Normalizado |
|------|------------------|------------------------|------------|------------------|
|      | M <sub>ref</sub> | M                      |            | En               |
| 1    | 89.831°          | 89.833°                | 0.002°     | 0.003            |
| 2    | 90.419°          | 89.552°                | 0.867°     | 1.275            |
| 3    | 90.158°          | 89.918°                | 0.240°     | 0.353            |
| 4    | 90.117°          | 89.913°                | 0.204°     | 0.300            |
| 5    | 89.908°          | 89.855°                | 0.053°     | 0.078            |

(1): Valor Absoluto

5. COMPARAÇÃO DE MEDIÇÕES.

Utilizando os dados da Tabela 1, consegue-se uma comparação gráfica das medições angulares dos dois sistemas na Fig. 7, e também a diferença de medição de cada ângulo na Fig. 8. Estas medições conferem a ortogonalidade da ferramenta, pois estes ângulos cumprem com a tolerância de  $\pm 0,5^\circ$  dos planos de fabricação de este corpo. É importante destacar que devido à irregularidades da geometria dos planos dos tubos quadrados estruturais que formam os eixos da ferramenta, dificulta o cumprimento desta ortogonalidade. As medições realizadas com o sistema fotogramétrico K-series comparam-se com às da MMC, indicando uma diferença não maior a  $0,59^\circ$ , também atingem o mesmo nível de resolução de centésimas de grau. Enquanto o sistema MMC expressa os ângulos em graus, minutos e segundos, o sistema K-series apresenta diretamente os valores em graus.

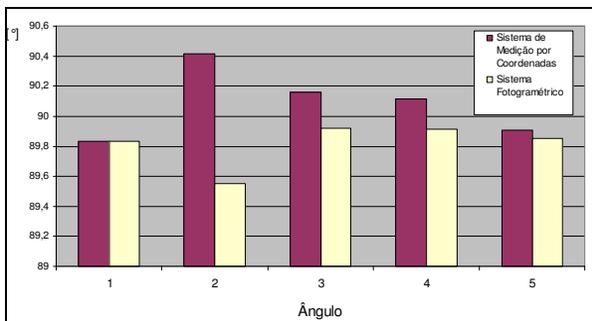


Fig. 7. Comparação de medições angulares entre os dois sistemas.

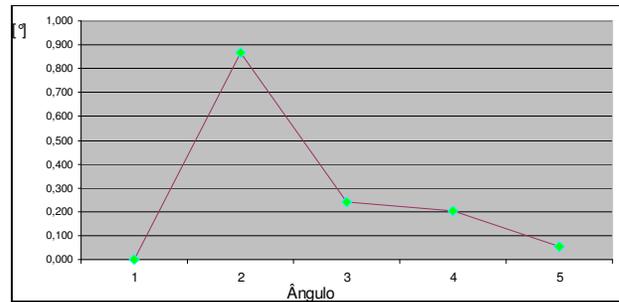


Fig. 8. Diferenças angulares (valores absolutos).

Da Tabela 2, o único ângulo que não cumpre a condição de conformidade é o ângulo 2, assim na Fig. 9 este valor ultrapassa a unidade.

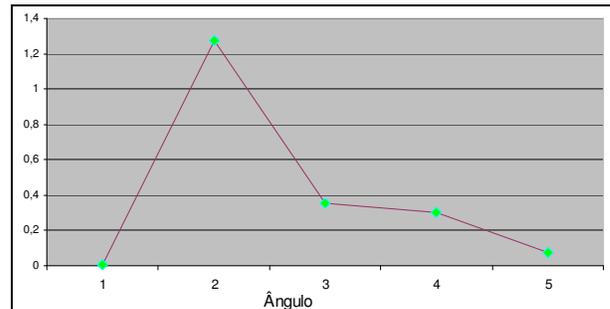


Fig 9. Erro Normalizado angular.

6. CONCLUSÕES

As primeiras medições realizadas com o sistema fotogramétrico apresentam uma boa confiabilidade quando comparado com o sistema de medição por coordenadas. Uma exceção ocorre na medição do ângulo 2, quando considerado o erro normalizado de 1.275 (Tabela 2), este também possui o maior desvio ou diferença das medições (Desvio =  $0.867^\circ$  na Tabela 2). Uma das causas, poderia ser uma irregularidade da geometria transversal dos tubos estruturais quadrados que constituem os eixos da ferramenta.

As incertezas angulares encontradas  $0,444^\circ$  e  $0,515^\circ$  para o sistema de medição por coordenadas e para o fotogramétrico respectivamente, comprovam que a maior precisão pertence ao primeiro, conferindo assim sua função como sistema de referencia, sendo também importante a consideração que o sistema fotogramétrico utilizado no presente trabalho ainda não tem sido amplamente estudado no meio nacional.

Embora o software do sistema fotogramétrico não ofereça as mesmas facilidades gráficas e de manuseio como às do sistema de medição por coordenadas, não deixa de ser uma boa ferramenta para a realização das medições, especialmente em corpos dinâmicos, como seria para a calibração de robôs; o que não pode ser feito com a MMC. Com relação ao tempo utilizado, é aproximadamente o mesmo para o desenvolvimento da mesma tarefa, e considerando o mesmo operador em ambos os sistemas.

Considerando as tarefas de uma maneira geral, as incertezas envolvidas estariam mais relacionadas com a exatidão dos algoritmos dos controladores dos respectivos softwares de cada equipamento, pois a influencia de operadores e da temperatura nos processos de medição são pouco significativas comparadas com às da geometria do

mensurando que neste caso correspondem aos eixos da ferramenta ortogonal.

Seria recomendável realizar outras medições com o equipamento fotogramétrico e conferir estes valores com outros sistemas de medição, tais como o iGPS (indoor Global Positioning System) ou o Laser Radar, para atingir um estudo mais detalhado de vantagens e desvantagens no uso de este equipamento fotogramétrico. Seria igualmente importante o desenvolvimento de um estudo para a planificação de experimentos, que possam identificar os possíveis fatores e seus níveis de significância na realização de medições. Embora o equipamento fotogramétrico utilizado tenha um sistema de compensação, seria interessante desenvolver futuras provas sobre flutuações de temperatura em sistemas fotogramétricos de câmera dupla[2]. Onde este possui um volume menor ao utilizado neste trabalho, com três câmeras.

### REFERÊNCIAS

- [1] Melo, F., Futado, L.F., Sutério, R., Gonzaga, L., 2008, "Análise de Viabilidade para Medição e Montagem de Estruturas de Grandes Volumes com o Sistema GPS-indoor", 5th National Congress of Mechanical Engineering, Salvador, Brazil.
- [2] Kruth, J.P., Zhou L., Vanherck P., 2003, "Thermal Error Analysis and Compensation of an LED-CMOS Camera 3D Measuring System", Measurement Science Review, Volume 3, Section 3.
- [3] Joseph S., Yuan C., 1989, "A General Photogrammetric Method for Determining Object Position and Orientation", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Volume 5, No. 2.
- [4] Baltsavias E. P., 1998, "A Comparison between Photogrammetry and Laser Scanning", Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology, ETH-Hoenggerberg, CH-8093 Zurich, Switzerland.
- [5] Clarke T.A., Wang X., Forbes A.B., "A Verification Methodology for Photogrammetry Systems", Optical Metrology Centre and National Physical Laboratory, UK.
- [6] M. R. Shortis, T. A. Clarke, S. Robson, "Practical Testing of the Precision and Accuracy of Target Image Centring Algorithms", Proc. SPIE Vol. 2598, p. 65-76, Videometrics IV, Sabry F. El-Hakim; Ed.
- [7] MITUTOYO, User Manual, "Coordinate Measuring Machine CNC Beyond – Crysta 700/900 Series [Main Unit]."
- [8] METRIS, K-series Optical CMM Data sheet, DS-K-series CMM-0611  
<[http://www.metris.com/optical\\_cmm/](http://www.metris.com/optical_cmm/)>
- [9] METRIS, Hardware & Software Guide, "Metris Help Pages on K400/K600."