



Avaliação da precisão posicional de um Sistema Laser Scanner Terrestre AM-CW a partir de uma placa de esferas 3D

Evaluation of the positional accuracy of an AM–CW terrestrial laser scanner system from a 3D sphere plate

*Paulo Augusto Ferreira Borges*¹
*Edvaldo Simões da Fonseca Junior*²
*Jorge Pimentel Cintra*³
*João Batista Tavares Junior*⁴

Recebido em setembro de 2017.
Aprovado em setembro de 2018.

RESUMO

A calibração de instrumento é reconhecida como um importante processo para a garantia de qualidade de dados obtidos a partir de um laser scanner terrestre (TLS). Um aspecto importante na garantia da qualidade de nuvem de pontos tridimensionais capturadas com instrumentos TLS é a calibração geométrica. Erros sistemáticos inerentes aos instrumentos, se não corrigidos, podem degradar a acurácia da nuvem de pontos obtida pelo scanner. Assim, o uso de metodologias de calibração de fácil utilização e manuseio permite quantificar e avaliar a qualidade e a acurácia dos sistemas lasers scanners terrestres e gerar coeficientes para correção dos erros sistemáticos. Este artigo apresenta a proposta de um novo método de avaliação da acurácia posicional de TLS utilizando-se um sistema tridimensional composto por uma placa com nove furos nos quais são alojadas nove esferas de poliacetal de 100 mm de diâmetro, ambos confeccionados utilizando a tecnologia de usinagem 3D. A partir da nuvem de pontos podem-se determinar as distâncias entre as esferas e calcular a acurácia do TLS a partir do conhecimento das coordenadas nominais do centro de cada esfera. Os resultados obtidos comprovam a eficiência da metodologia de cálculo utilizando-se a distância entre as esferas, validando-a como uma alternativa para procedimentos de calibração em laboratório a partir de varreduras de curto alcance, permitindo a determinação da acurácia posicional do instrumento.

¹ Mestrado em Engenharia de Transportes. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Campus Inconfidentes, Brasil. E-mail: paulo.borges@ifsuldeminas.edu.br

² Doutorado em Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da USP – EPUSP / Departamento de Engenharia de Transportes – PTR, Brasil. E-mail: edvaldoj@usp.br

³ Doutorado em Engenharia Civil e Urbanismo. Escola Politécnica da USP – EPUSP / Departamento de Engenharia de Transportes – PTR, Brasil. E-mail: jpcintra@usp.br

⁴ Doutorado em Ciências Geodésicas. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Formosa. Brasil. E-mail: joao.tavares@ifg.edu.br

PALAVRAS-CHAVE: Laser scanner terrestre. Nuvem de pontos. Erros. Calibração. Precisão. Acurácia.

ABSTRACT

Instrument calibration is recognized as an important process for quality assurance of data obtained from a terrestrial laser scanner (TLS). An important aspect in ensuring the quality of three-dimensional point cloud captured with TLS instruments is geometric calibration. Systematic errors inherent in the instruments, if not corrected, can degrade the accuracy of the cloud of points obtained by the scanner. Thus, the use of an easy-to-apply methodology for TLS measurement allows quantification and evaluation of the quality and accuracy of a terrestrial laser scanner. This paper presents the proposal of a new method for evaluation of the positional accuracy of TLS measurement using a three-dimensional system composed of a plate with nine holes made by means of a 3D machining and by nine spheres of polyacetal measuring 100 mm in diameter. Through the cloud of points, it is possible to determine the distances between the spheres and to calculate the accuracy of the TLS from the knowledge of the nominal coordinates of the center of each sphere. The obtained results prove the efficiency of the calculation methodology using the distance between the spheres, making it an alternative for laboratory calibration procedures from short-range scans.

KEYWORDS: Terrestrial laser scanner. Cloud of points. Errors. Calibration. Precision. Accuracy.

* * *

Introdução

O Laser Scanner Terrestre (TLS – Terrestrial Laser Scanner) é um instrumento que tem sido utilizado há mais de duas décadas para obter coordenadas tridimensionais (x_i, y_i e z_i) de pontos medidos sobre a superfície de diferentes objetos. Devido à sua alta precisão, rápida aquisição de dados e ampla cobertura espacial, aliada a uma ampla cobertura espacial que permite a obtenção de nuvens de pontos a taxas superiores a 900.000 pontos/s, estes equipamentos têm sido utilizados em diferentes aplicações, por exemplo, na geração de maquetes 3D (as-built) para plantas industriais, documentação digital visando a preservação de patrimônios históricos, aplicações em geologia e mineração visando a obtenção de volumes a partir da geração de modelos digitais do terreno com precisão da ordem do centímetro, criminalística (investigação de cenas de crimes) (SCHULZ, 2007).

O Laser Scanner Terrestre é um instrumento que permite mapear pequenos e grandes objetos e/ou superfície com uma densa nuvem de pontos tridimensionais. Os principais componentes que permitem a aquisição das coordenadas tridimensionais dos pontos e seus respectivos níveis de intensidade de retorno do sinal emitido são os dispositivos de obtenção da distância, o sistema de medição de refletância e o sistema de medição angular (BOEHLER; BORDAS; MARBS, 2003).

Em geral, um TLS emite um pulso laser, o qual é desviado por um dispositivo de rotação (espelho ou prisma) em direção ao objeto. Este dispositivo permite desviar o feixe laser em duas direções (horizontal e vertical) e é considerado o segundo componente mais importante de um TLS. O pulso laser é refletido de forma difusa pelo objeto, e parte dele retorna ao instrumento, o qual é analisado e utilizado para calcular a distância, no caso do instrumento utilizado nos experimentos, pelo método de comparação de fase, ou seja, pela medida da defasagem entre a onda emitida e a onda de retorno. O equipamento registra ainda, a intensidade da energia refletida (refletância) pelo objeto e os parâmetros de atitude do feixe (ângulos de elevação e azimute) em relação ao referencial do laser, a partir dos quais é possível obter as coordenadas tridimensionais dos pontos que definem os objetos escaneados.

Diferenças angulares em torno de trinta segundos podem, em função da distância do instrumento para o objeto investigado, gerar erros da ordem de décimos de milímetros nas coordenadas dos pontos.

A precisão angular depende ainda do correto posicionamento do dispositivo de rotação e da acurácia do dispositivo de medição angular (COSARCA; JOCEA; SAVU, 2009).

A calibração geométrica de um TLS tem se mostrado uma ferramenta necessária para garantir a qualidade de uma nuvem de pontos 3D. A presença de erros sistemáticos inerentes ao instrumento, quando não corrigidos, degrada sobremaneira a acurácia da nuvem de pontos obtidas com um scanner.

Segundo Chow, Lichti e Teskey (2010) verifica-se que mesmo nos lasers scanners modernos há a presença de erros sistemáticos, ainda que estes tenham sido aferidos pelos fabricantes em laboratórios de calibração. Inúmeros pesquisadores em todo o mundo têm se dedicado a identificar tendências sistemáticas nos resíduos das observações de laser scanners que deterioram sobremaneira a precisão e a acurácia das medições de distâncias e ângulos.

Alguns trabalhos apresentados por Lichti (2007, 2008 e 2010) e Chow, Lichti e Teskey (2010) propõem a modelagem destes erros sistemáticos utilizando-se de uma auto-calibração, obtida a partir da coleta de um conjunto de observações altamente redundantes sobre vários alvos fixos, posicionando-se o instrumento em diferentes estações. As variáveis do modelo compreendidas pela posição do scanner j , os elementos de orientação angular, os parâmetros dos alvos e os coeficientes dos erros sistemáticos são chamados de Parâmetros Adicionais (AP's), os quais são estimados a partir das observações aplicando-se um ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). As vantagens da utilização da auto-calibração de TLS incluem a otimização da estimativa de todas as variáveis do modelo, sem a necessidade de equipamentos especiais ou o conhecimento prévio das coordenadas dos alvos utilizados. Neste caso, utiliza-se apenas uma sala com vários alvos sinalizados, os quais serão escaneados a partir de diferentes estações.

Outras abordagens de auto-calibração de TLS são apresentadas com algumas variações. Reshetyuk (2006) propõe a utilização de um modelo matemático em que as coordenadas dos alvos no sistema externo são determinadas de forma independente a partir de uma estação total cujos valores, uma vez conhecidos, tornam-se injunções no modelo. Nesta proposta as coordenadas da posição do scanner podem também serem determinadas a partir do uso da estação total ou serem estimadas a partir do ajustamento por MMQ.

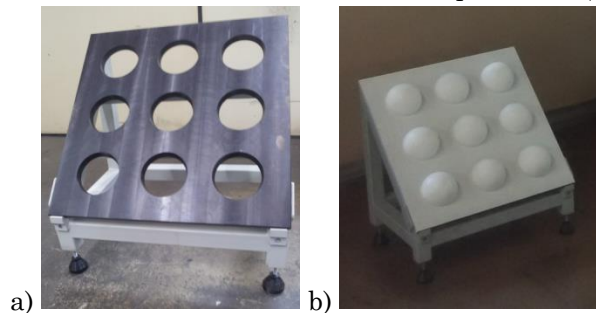
Com o objetivo de estabelecer uma metodologia sistemática de análise de erros, que permita a avaliação de equipamentos Laser Scanners Terrestre, encontra-se neste artigo uma proposta efetiva e de maior facilidade de implementação para determinação da acurácia tridimensional de laser scanner terrestre.

2 Material e Métodos

2.1 Placa de Esferas

A metodologia proposta utiliza-se esferas para realizar a calibração de um TLS, as quais são encaixadas em um suporte constituído com nove furos. Cada furo foi construído com o diâmetro adequado para acoplar uma esfera de poliacetal com 100 mm de diâmetro, fabricada com rigor e padrão de precisão no centésimo de milímetro. O conjunto com nove esferas foi usado como referência para a determinação dos erros tridimensionais do scanner. O único requisito é a determinação das coordenadas do centro de cada esfera com nível de precisão superior ao proposto por um TLS, de preferência melhor que milímetro, permitindo assim o conhecimento das distâncias entre elas. A Figura 1 ilustra a placa com esferas construída para aplicação do método proposto, onde utilizou-se um suporte com inclinação de 45 graus visando otimizar o ângulo de incidência do feixe laser.

Figura 1 – Suporte das esferas para aferição de TLS (a) e após pintura com tinta automotiva na cor branca com esferas de poliacetal (b).

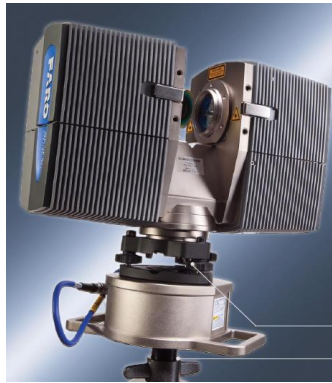


Fonte: Elaborado pelos autores.

2.2 TLS Faro Photon 80

Para avaliação da metodologia proposta realizou-se a calibração de um TLS modelo Faro Photon 80, fabricado pela empresa americana FARO Technologies (Figura 2).

Figura 2 – Laser Scanner Faro Photon 80.



Fonte: FARO TechSheet – Photon 80

Este equipamento utiliza do método AMCW (Amplitud-Modulated Continuous Wave) para determinação da distância, operando através da modulação da energia eletromagnética emitida a partir de uma onda senoidal em uma dada frequência.

Segundo o fabricante, as especificações técnicas do TLS Faro Photon 80 garantem um erro padrão de $\pm 2\text{mm}$ para a medição em distâncias mínima de 0,6 metros e máxima de 25,0 metros, e uma resolução angular horizontal de $\pm 0,00076^\circ$ e vertical de $\pm 0,009^\circ$.

Segundo Boehler, Bordas e Marbs (2003), o termo resolução é usado em diferentes contextos quando se discute eficiência de um TLS. A partir do ponto onde se encontra o TLS, a resolução descreve a habilidade de se detectar pequenos objetos ou características específicas de um objeto na nuvem de pontos. Do ponto de vista técnico, tem-se duas especificações que contribuem para esta habilidade: o menor incremento angular possível entre dois pontos sucessivos na nuvem de pontos e o tamanho da projeção do laser no objeto escaneado. A maioria dos equipamentos TLS permite que o usuário defina a

resolução desejada. Vale salientar que a resolução escolhida determinará o tempo necessário para se realizar uma varredura completa, podendo-se entender o termo resolução como sendo a velocidade de varredura de um TLS.

Ao configurar a resolução de varredura de um equipamento TLS, o usuário poderá optar pela velocidade máxima ou velocidades menores previamente estabelecidas pelo instrumento, que variam proporcionalmente ($1/2$, $1/4$; $1/5$, $1/8$, $1/10$, etc.) à máxima velocidade disponibilizada pelo instrumento.

Para o processo de varredura tridimensional da placa com esferas, definiram-se seis diferentes distâncias para o posicionamento do TLS a ser aferido: 1, 3, 5, 10, 15, e 20 metros. Para as distâncias de 1 a 5 metros foram realizadas 5 varreduras com o TLS Faro Photon 80 configurando-se diferentes velocidades: $1/2$, $1/4$, $1/5$, $1/8$ e $1/10$ do valor máximo do equipamento que é de 120.000 pontos por segundo. A velocidade máxima não foi utilizada em distâncias curtas devido ao tempo de coleta ficar elevado aumentando-se também o volume de dados a serem processados.

Devido ao diâmetro das esferas ser de apenas 100 mm, foram utilizadas as velocidades de $1/2$, $1/4$, $1/5$ e $1/8$ para a distância de 10 metros e com velocidade máxima de $1/1$ e de $1/2$ para as distâncias de 15, e 20 metros. Estas configurações foram definidas para obter uma quantidade mínima de pontos necessários para identificação das esferas no processo de consolidação e registro realizado no software Faro Scene Versão 4.8.4.26611. Este processo foi necessário para a obtenção das coordenadas do centro de cada esfera nas diferentes nuvens de pontos obtidas durante os experimentos.

2.3 Calibração do suporte com as esferas

Embora a usinagem da peça seja feita seguindo padrões rigorosos de controle de qualidade e precisão, foi necessário efetuar uma calibração das coordenadas dos centros das esferas a partir da utilização de um equipamento com precisão superior à do TLS Faro Photon 80. Para a determinação das

coordenadas de centro de cada furo, alojaram-se as esferas sobre a placa de aço e efetuou-se a calibração utilizando um braço de medição portátil, modelo Homer Absolute, fabricado pela Hexagon Metrology. Este procedimento foi realizado por uma empresa especializada na medição de produtos e dispositivos de montagem e inspeção. Abaixo, têm-se as especificações de precisão do equipamento utilizado:

Tabela 1 – Especificações técnicas do braço de medição portátil modelo Homer Absolute.

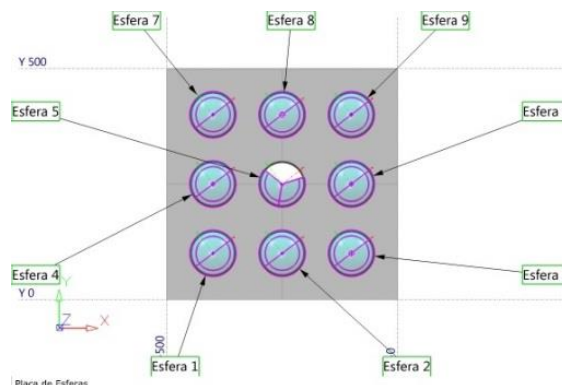
Modelo	Alcance	Repetitividade Apalpação	Exatidão Volumétrica	Peso do Braço
7125	2,5 m (8,2 ft)	0,050 mm (0,0020 in)	0,069 mm (0,0027 in)	7,9 kg (17,42 lb)

Fonte: Hexagon Metrology.

A especificação do equipamento indica uma precisão de 5 centésimos de milímetro, apresentando, portanto, precisão superior à do equipamento TLS utilizado.

Para controle das distâncias de referência a serem utilizadas no método de calibração proposto, definiu-se um esquema de numeração de cada furo, visando a identificação das esferas e das distâncias entre elas, conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3 – Esquemática e numeração das esferas sobre o suporte.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Após a execução dos serviços de calibração das peças obtiveram-se, a partir do braço de medição portátil, as coordenadas nominais do centro de cada esfera, apresentadas na Tabela 2. O braço de medição portátil permitiu a determinação das coordenadas de uma série de pontos sobre a superfície das esferas, a partir dos quais foram determinadas as coordenadas dos centros de cada esfera.

Tabela 2 – Coordenadas nominais para o centro de cada esfera.

Esfera	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
ESF01	-399,956	100,023	5,090
ESF02	-249,957	100,066	5,023
ESF03	-99,913	100,089	4,970
ESF04	-400,115	250,013	5,398
ESF05	-250,014	250,091	4,910
ESF06	-100,027	250,097	4,962
ESF07	-400,066	400,095	5,113
ESF08	-250,076	400,090	4,772
ESF09	-100,079	400,088	4,933

Fonte: Elaborado pelos autores.

Utilizando estas coordenadas, calcularam-se as distâncias nominais entre os centros de cada esfera, as quais são apresentadas na Tabela 3. Vale ressaltar que as dimensões aqui apresentadas na ordem do milésimo do milímetro, se justificam uma vez que o braço de medição portátil possui precisão de centésimo de milímetro, deixando o algarismo duvidoso no milésimo de milímetro.

Tabela 3 – Distâncias nominais entre os centros de cada par de esferas (Esferas 1-5 a 2-5)

Distâncias nominais entre centros (mm)					
Esfera	ESF01	ESF02	ESF03	ESF04	ESF05
ESF01	0,000	149,999	300,043	149,990	212,139
ESF02		0,000	150,044	212,207	150,025
ESF03			0,000	335,557	212,205
ESF04				0,000	150,102
ESF05					0,000

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 4 – Distâncias nominais entre os centros de cada par de esferas (Esferas 1-9 a 6-9)

Distâncias nominais entre centros (mm)				
Esfera	ESF06	ESF07	ESF08	ESF09
ESF01	335,380	300,072	335,417	424,223
ESF02	212,104	335,485	300,024	335,375
ESF03	150,008	424,377	335,484	299,999
ESF04	300,088	150,082	212,215	335,476
ESF05	149,987	212,172	149,999	212,084
ESF06	0,000	335,444	212,162	149,991
ESF07		0,000	149,990	299,987
ESF08			0,000	149,997
ESF09				0,000

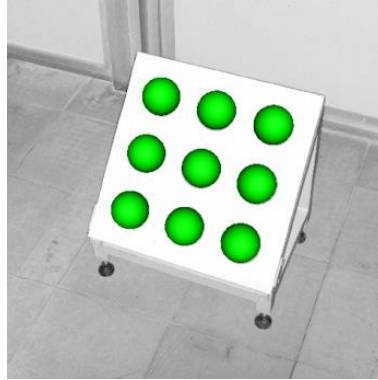
Fonte: Elaborado pelos autores.

Em função das coordenadas dos centros de cada esfera, calcularam-se todas as distâncias possíveis entre elas e realizou-se uma análise em relação às distâncias nominais calculadas com as coordenadas de centro obtidas durante a calibração da peça.

2.4 Modelo Matemático

Para obter os parâmetros de correção dos erros nos três eixos do TLS propôs-se a utilização de um ajustamento pelo MMQ com o objetivo de obter as coordenadas tridimensionais do centro do scanner e seus respectivos desvios padrões a partir das coordenadas tridimensionais conhecidas dos centros das esferas. Assim realizou-se a varredura da placa de esferas 3D a partir de diferentes distâncias, determinando-se posteriormente as coordenadas do centro de cada esfera na nuvem de pontos obtida de cada varredura. Para isso, utilizou-se o software FARO Scene Version 4.8.4.26611, que disponibiliza o algoritmo de reconhecimento automático de alvos esféricos a partir da nuvem conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4 – Esferas modeladas a partir da nuvem de pontos da placa de aço com as esferas virtuais sobrepostas.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Considerando-se as distâncias observadas entre o centro do scanner e o centro de cada esfera, optou-se pelo método dos parâmetros para efetuar o ajustamento das observações, cujo modelo matemático apresentado na equação (1) expressa os valores observados ajustados como uma função explícita dos parâmetros ajustados.

$$\rho_{ij} = \sqrt{(X_i - x_j)^2 + (Y_i - y_j)^2 + (Z_i - z_j)^2} \quad (1)$$

Onde:

ρ_{ij} é a distância observada entre cada esfera posicionada no furo i a partir da estação j onde se encontra o scanner;

X_i, Y_i e Z_i são as coordenadas cartesianas nominais de cada esfera no furo i ;

x_j, y_j e z_j são as coordenadas cartesianas desconhecidas da posição do scanner em cada estação j .

2.5 Estimativa da acurácia das coordenadas

Segundo Reshetyuk (2006), é possível estimar a acurácia das coordenadas dos alvos obtidas com o TLS. Para isso, utiliza-se as coordenadas da nuvem de pontos para determinar as distâncias entre cada par de alvos e em seguida avaliar a discrepância em relação às mesmas distâncias determinadas utilizando as coordenadas “verdadeiras” provenientes da calibração do suporte com as esferas 3D. Assim, a acurácia pode ser determinada a partir da equação 2 abaixo:

$$\sigma_{\text{alvo } j} = \sqrt{\frac{(d_{\text{TLS } jk} - d_{\text{NOM } jk})^2}{2}} \quad (2)$$

Onde:

$\sigma_{\text{alvo } j}$ é o erro nas coordenadas do j -ésimo alvo;

$d_{\text{TLS } jk}$ e $d_{\text{NOM } jk}$ são as distâncias das linhas de base entre um alvo j para um alvo k , medidas a partir da nuvem do TLS e a partir dos valores nominais, respectivamente.

A análise por meio de comparação direta das coordenadas obtidas pelo TLS com as coordenadas nominais obtidas no processo de calibração da peça não foi utilizada devido à necessidade de alteração do sistema de referência das coordenadas de cada nuvem de pontos (intersecção dos eixos horizontal, vertical e de colimação do instrumento) para o sistema de referência da peça, necessitando para isso de transformações na nuvem de pontos, o que implicaria em erros adicionais à nuvem original.

3 Resultados e Discussão

Inicia-se a apresentação e discussão dos resultados deste experimento avaliando-se a precisão na determinação das coordenadas do centro de cada esfera i a partir de cada posição j do scanner. Para isso, fez-se uma análise comparativa de todas as possíveis distâncias entre as esferas obtidas da nuvem de pontos em relação às distâncias nominais. Os valores das coordenadas nominais do centro de cada esfera foram apresentados na Tabela 2. As distâncias nominais entre cada par de esferas foram apresentadas nas Tabelas 3 e 4. Na Tabela 5 há um exemplo de coordenadas do centro das esferas obtidas a partir da nuvem de pontos.

Tabela 5 – Coordenadas para o centro de cada esfera obtidas com a configuração de velocidade de 1:2 para a distância de 1 metro.

Esfera	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
ESF01	1348	-491	-1519
ESF02	1234	-593	-1521
ESF03	1119	-692	-1519
ESF04	1419	-575	-1413
ESF05	1303	-677	-1411
ESF06	1191	-774	-1411
ESF07	1491	-655	-1304
ESF08	1373	-755	-1300
ESF09	1261	-856	-1303

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Tabela 6 apresenta-se um exemplo com as distâncias calculadas a partir da nuvem de pontos e suas respectivas discrepâncias em relação às distâncias nominais. As distâncias foram posicionadas acima da diagonal principal e as discrepâncias abaixo.

Tabela 6 – Distâncias (mm) calculadas entre o centro de cada par de esferas e as discrepâncias (mm) para a nuvem de pontos com a configuração de velocidade de 1:2 e distância de 1 metro (Esferas 1-9 a 1-5).

ESFERA	ESF01	ESF02	ESF03	ESF04	ESF05
ESF01	0	153	304	153	219
ESF02	-3	0	152	215	155
ESF03	-4	-2	0	339	214
ESF04	-3	-3	-4	0	154
ESF05	-7	-5	-2	-4	0
ESF06	-6	-4	-3	-3	1
ESF07	-6	-7	-7	-3	-5
ESF08	-8	-7	-6	-4	-2
ESF09	-8	-7	-6	-5	-1

Fonte: Elaborado pelos autores.

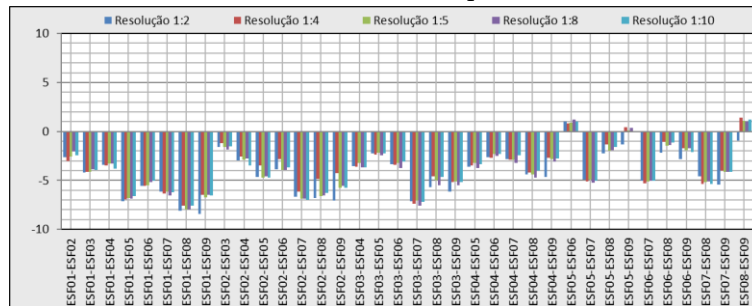
Tabela 7 – Distâncias (mm) calculadas entre o centro de cada par de esferas e as discrepâncias (mm) para a nuvem de pontos com a configuração de resolução de 1:2 e distância de 1 metro (Esferas 1-9 a 6-9).

ESFERA	ESF06	ESF07	ESF08	ESF09
ESF01	341	306	344	433
ESF02	216	342	307	342
ESF03	153	431	341	306
ESF04	303	153	217	340
ESF05	149	217	152	213
ESF06	0	341	214	153
ESF07	-5	0	155	305
ESF08	-2	-5	0	151
ESF09	-3	-5	-1	0

Fonte: Elaborado pelos autores.

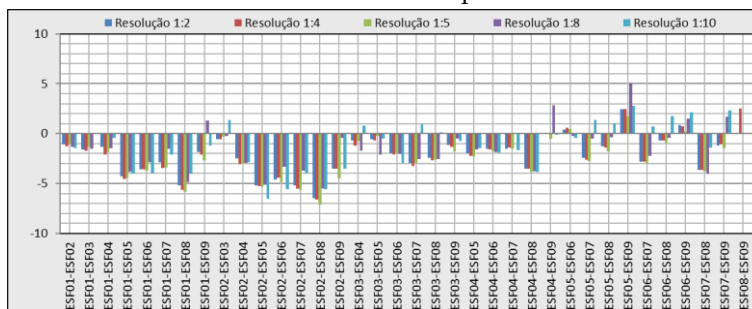
Para uma melhor visualização dos resultados obtidos para as demais distâncias e resoluções elaborou-se os gráficos das Figuras 5 a 10 mostrando a variação dos resultados para cada situação.

Figura 5 – Discrepâncias (mm) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 1 metro.



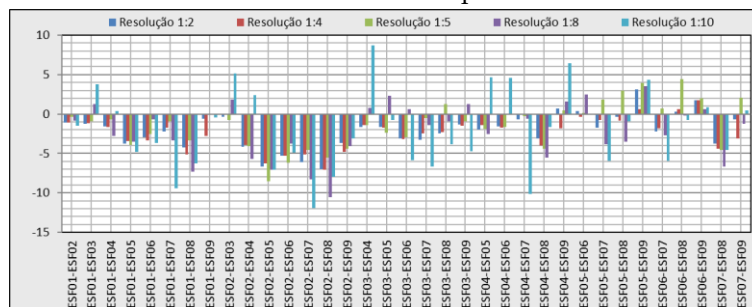
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 6 – Discrepâncias (mm) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 3 metros.



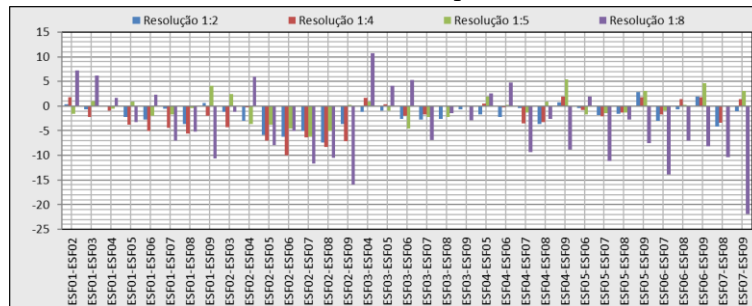
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 7 – Discrepâncias (mm) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 5 metros.



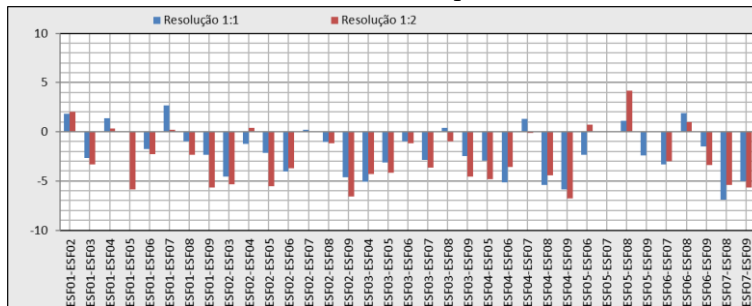
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 8 – Discrepâncias (mm) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 10 metros.



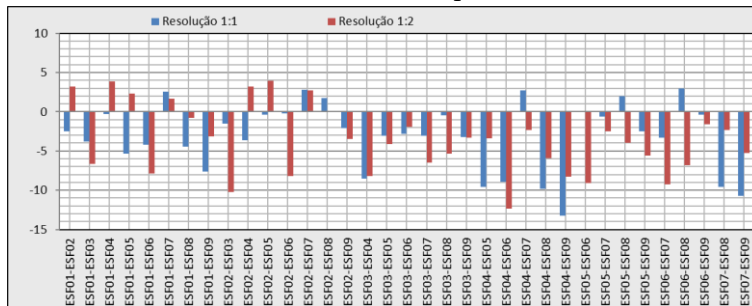
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 9 – Discrepâncias (mm) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 15 metros.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 10: Discrepâncias (mm) nas distâncias entre as esferas para a nuvem de pontos obtida com o TLS a uma distância aproximada de 20 metros.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Observando-se os gráficos apresentados, verificou-se que à medida que se aumenta a distância de varredura, a velocidade de medição não se mostrou suficiente para definição das esferas, o que impossibilitou a avaliação do método proposto nas velocidades de 1/10 para a distância de 10 metros e 1/10, 1/8, 1/5 e 1/4 para as distâncias de 15 e 20 metros. Para a distância de 25

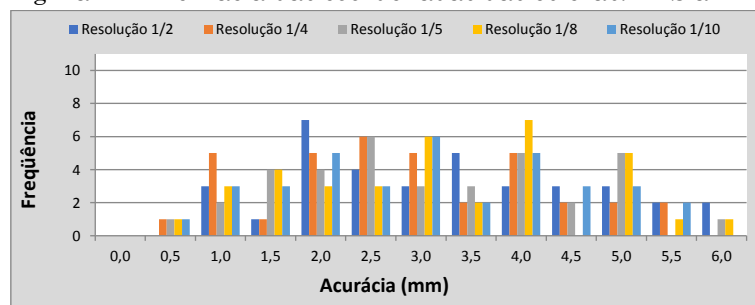
metros não foi possível a definição das esferas em nenhuma das velocidades disponíveis no TLS.

De maneira geral observa-se que as variações nas discrepâncias aumentam à medida que aumenta a distância de varredura mostrando que esta metodologia permite avaliar a qualidade da nuvem de pontos obtida nas diferentes situações.

Na distância de 15 metros observa-se uma melhora aparente nos resultados alcançados, que se justificam em função de ter se utilizado a maior velocidade possível.

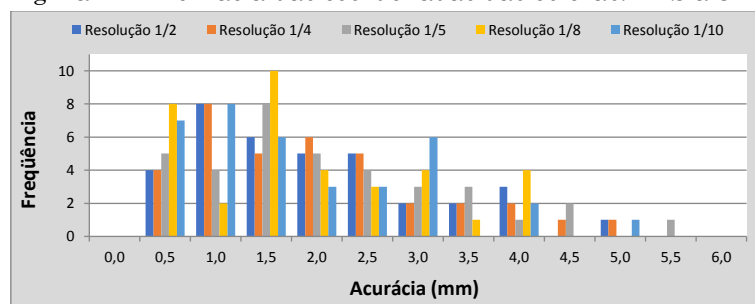
Visando calcular a acurácia das coordenadas dos centros das esferas obtidas a partir da nuvem de pontos, utilizou-se a equação 2, permitindo assim o cálculo em função das distâncias entre cada par de esferas. As Figuras 11 a 16 mostram a distribuição da acurácia calculada para cada distância em cada uma das velocidades de varredura utilizadas.

Figura 11 – Acurácia das coordenadas das esferas: TLS a 1 m.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 12 – Acurácia das coordenadas das esferas: TLS a 3 m.



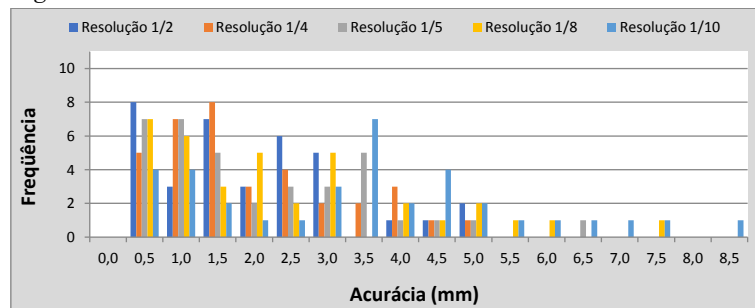
Fonte: Elaborado pelos autores.

Nestas duas primeiras resoluções verifica-se que a acurácia para a distância de 3 metros foi em média menor que para a distância de 1 metro. Uma das causas pode estar relacionada a uma melhor configuração geométrica nesta distância permitindo um ângulo de incidência mais favorável. Outra explicação plausível refere-se ao efeito de bordas.

Segundo Boehler, Bordas e Marbs (2003), quando se utiliza de alvos esféricos ou cilíndricos pode-se observar um efeito sistemático na nuvem de pontos obtida a distâncias próximas. Neste contexto, em partes periféricas do objeto o centro da área da superfície refletora não coincide ao centro real, devido às distorções atribuídas ao efeito de bordas.

A seguir têm-se as distribuições para as demais distâncias.

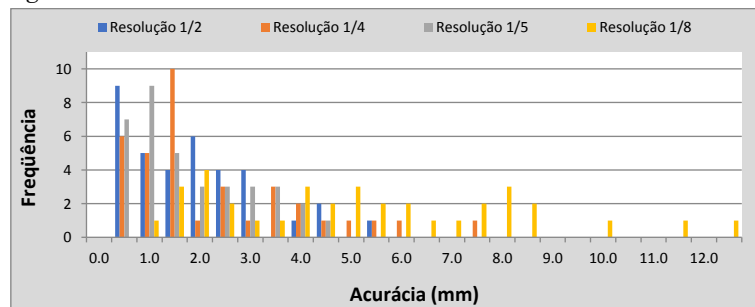
Figura 13 – Acurácia das coordenadas das esferas: TLS a 5 m.



Fonte: Elaborado pelos autores.

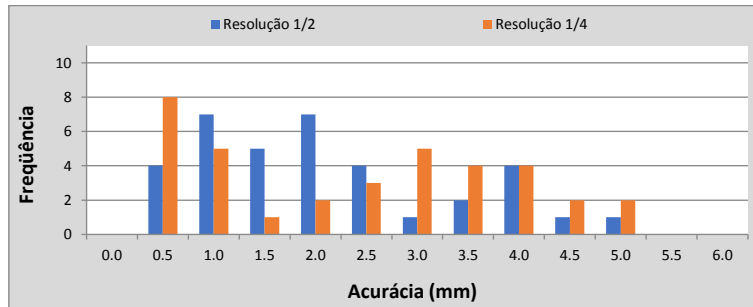
Para a distância de 5 metros percebe-se um aumento no valor da acurácia média à medida que se diminui a resolução, comprovando a degradação decorrente da diminuição da quantidade de pontos para definição das esferas.

Figura 14 – Acurácia das coordenadas das esferas: TLS a 10 m.



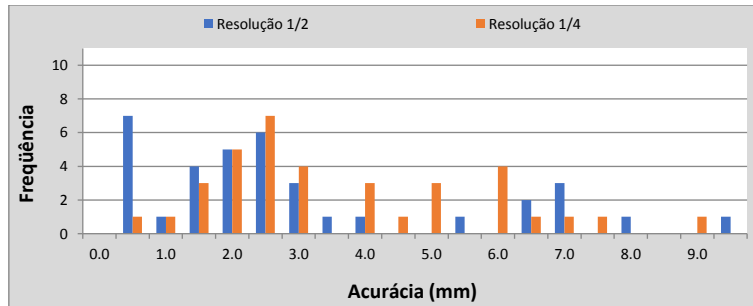
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 15 – Acurácia das coordenadas das esferas: TLS a 15 m.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 16 – Acurácia das coordenadas das esferas: TLS a 20 m.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os valores das acurácias médias e respectivos desvios padrões para cada distância e resolução são apresentados na Tabela 8 a seguir.

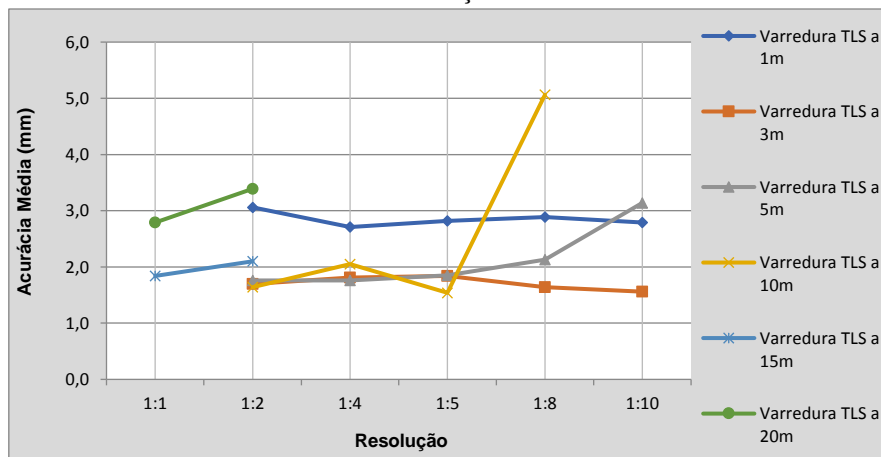
Tabela 8 – Acurácia e respectivo desvio padrão médio calculado para cada distância e resolução.

Distância	Scanner a 1 Metro						Scanner a 3 Metros					
	1:1	1:2	1:4	1:5	1:8	1:10	1:1	1:2	1:4	1:5	1:8	1:10
Média (mm)		3.1	2.7	2.8	2.9	2.8		1.7	1.8	1.8	1.6	1.6
Desvio (mm)		1.5	1.4	1.4	1.4	1.4		1.1	1.2	1.2	1.2	1.2
	Scanner a 5 Metros						Scanner a 10 Metros					
	1:1	1:2	1:4	1:5	1:8	1:10	1:1	1:2	1:4	1:5	1:8	1:10
Média (mm)		1.8	1.8	1.9	2.1	3.1		1.6	2.1	1.5	5.1	X
Desvio (mm)		1.3	1.3	1.5	1.8	2.1		1.3	1.8	1.2	3.2	X
	Scanner a 15 Metros						Scanner a 20 Metros					
	1:1	1:2	1:4	1:5	1:8	1:10	1:1	1:2	1:4	1:5	1:8	1:10
Média (mm)	1.8	2.1	X	X	X	X	2.8	3.4	X	X	X	X
Desvio (mm)	1.3	1.5	X	X	X	X	2.5	2.1	X	X	X	X

Fonte: Elaborado pelos autores.

Observando os valores das acurácias médias apresentados na Tabela 8, verifica-se que não há uma influência significativa da distância de varredura nos resultados obtidos, evidenciando que a metodologia de cálculo atendeu as expectativas, uma vez que os valores se aproximaram da especificação nominal do fabricante para determinação de distâncias (2 mm). O que se observa na maioria dos casos, quando se diminuía a resolução, foi uma pior acurácia média, o que pode ser mais bem representado através do gráfico da Figura 17 a seguir.

Figura 17 – Comportamento da acurácia média em função da distância e diferentes resoluções.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na distância de 1 metro os resultados apresentaram-se ligeiramente acima das demais distâncias, podendo ter sofrido influências devido ao efeito de bordas.

Na menor resolução em que se conseguiu realizar a varredura a 10 metros de distância, percebe-se a influência da densidade da nuvem de pontos dos alvos esféricos na determinação das coordenadas do centro das esferas, o que provocou um erro em torno de 5 mm, superior à média dos erros observados nas demais condições.

Realizadas as análises das distâncias entre as esferas realizaram-se os cálculos para avaliação da segunda metodologia proposta para análise dos dados de varredura coletados sobre a placa de esferas, que consiste em

determinar as coordenadas da posição do scanner por meio de um ajustamento pelo MMQ, utilizando-se o método paramétrico, conforme descrito no tópico 2.4. Os cálculos necessários foram executados após a programação de uma rotina, visando facilitar a execução do ajustamento pelo MMQ.

Após o ajustamento obteve-se o cálculo da posição do scanner na estação j para cada distância e velocidades propostas. Vale ressaltar que as coordenadas da posição do scanner são determinadas a partir do sistema de referência da Placa de Esferas 3D, conforme ilustra a Figura 18 a seguir.

Figura 18 – Sistema de Eixos da Placa de Esferas 3D.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Uma vez que as coordenadas para a posição do scanner foram consideradas como parâmetros no ajustamento pelo MMQ, obteve-se ainda a estimativa de precisão para estas coordenadas, as quais foram consideradas como sendo o erro do scanner em cada eixo.

Para avaliar a qualidade do ajustamento aplicou-se o teste estatístico do qui-quadrado. Em função do posicionamento de nove furos na placa de esferas foi possível a medição de nove observações de distâncias visando o cálculo de três parâmetros. Com isso o número de graus de liberdade será de $v = 9 - 3 = 6$. Considerando-se o número de graus de liberdade calculado e o

valor $\alpha = 95\%$ de significância, obtém-se da tabela de distribuição estatística do qui-quadrado os seguintes valores para os limites superior e inferior:

$$\text{limite superior} \rightarrow \chi_{6; \frac{1-\alpha}{2}}^2 = 14,449 \quad (3)$$

$$\text{limite inferior} \rightarrow \chi_{6; \frac{1+\alpha}{2}}^2 = 1,2370 \quad (4)$$

O resumo dos resultados obtidos após o ajustamento pelo MMQ é apresentado na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 – Coordenadas do centro do TLS na posição j, valores de desvios padrões correspondentes a cada posição e resultado da estatística do qui-quadrado calculada ao nível de significância de 95%.

Distância do TLS	Posição J do Scanner			Resolução	Desvio X (mm)	Desvio Y (mm)	Desvio Z (mm)	Estatística Xc
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)					
1 Metro	-299.3	-291.3	1955.7	1:2	8.3	8.3	2.4	✓ 3.319
	-298.8	-292.1	1956.1	1:4	6.8	6.8	1.9	✓ 2.247
	-296.5	-291.9	1956.7	1:5	6.6	6.6	1.9	✓ 2.102
	-296.1	-292.2	1957.0	1:8	6.8	6.8	1.9	✓ 2.255
	-295.9	-292.3	1957.4	1:10	6.0	6.0	1.7	✓ 1.729
3 Metros	-351.4	1119.0	3371.3	1:2	8.3	8.3	3.7	✓ 6.000
	-350.3	1123.1	3370.7	1:4	8.7	8.7	3.9	✓ 6.000
	-344.9	1126.3	3370.5	1:5	9.1	9.1	4.1	✓ 6.000
	-361.7	1111.9	3373.3	1:8	9.4	9.4	4.2	✓ 1.306
	-336.2	1125.3	3372.2	1:10	14.6	14.6	6.5	✓ 3.116
5 Metros	-505.4	2537.2	4746.7	1:2	23.9	23.9	14.5	✓ 3.706
	-488.0	2542.4	4746.6	1:4	22.5	22.5	13.7	✓ 3.277
	-499.9	2523.3	4755.6	1:5	30.8	30.8	18.6	✓ 6.155
	-499.9	2544.9	4743.3	1:8	22.5	22.5	13.7	✓ 3.270
	-499.0	2577.2	4724.2	1:10	27.9	27.9	17.2	✓ 5.031
10 Metros	-619.6	6125.6	8398.4	1:2	22.8	22.8	17.5	✓ 6.000
	-636.5	6138.9	8386.7	1:4	40.9	40.9	31.4	✓ 2.961
	-638.2	6095.0	8420.0	1:5	36.5	36.5	27.8	✓ 2.363
	-689.8	6170.3	8358.1	1:8	33.2	33.2	25.7	✓ 1.947
15 Metros	-267.5	9449.9	-11987.7	1:1	63.7	63.7	51.6	✓ 3.345
	-257.2	9524.0	-11930.9	1:2	50.7	50.8	41.7	✓ 2.125
20 Metros	-145.6	12789.2	-15725.7	1:1	120.4	120.4	99.9	✓ 6.754
	-401.5	12929.4	-15600.6	1:2	131.6	131.6	111.4	✓ 8.070

Fonte: Elaborado pelos autores.

Observando os resultados apresentados verifica-se que a metodologia de cálculo proposta se adequa melhor quando o TLS está posicionado próximo

à placa de esferas. Ainda assim os valores dos desvios padrões ficam bem superiores quando comparado à acurácia obtida no método de cálculo anterior, baseado na distância entre as esferas. Para as distâncias maiores de 15 e 20 metros, os valores dos desvios padrões calculados aumentam consideravelmente atingindo a casa do décimo, levando-se ao entendimento que tais erros não são devidos aos erros provenientes do instrumento, mas sim à configuração geométrica com menor rigidez à medida que se afasta da placa de esferas. Esta análise tem sua fundamentação baseada nos valores das discrepâncias entre as esferas analisadas anteriormente.

Observando os gráficos das Figuras 5 a 10 verificam-se que os valores das diferenças não são tão altos quanto àqueles desvios apresentados nas observações realizadas com distâncias de 5, 10, 15 e 20 metros. Sendo assim, pode-se afirmar que a metodologia de cálculo proposta é recomendada apenas para distâncias curtas (< 5 metros), podendo ser implementada em laboratório. Observa-se que o processo de cálculo da posição do scanner é dependente da geometria dos pontos de controle (esferas) diminuindo-se a rigidez da rede à medida que se aumenta a distância.

Quanto à análise estatística, verificou-se que em todas as situações conseguiu-se a aceitação da hipótese básica, indicando a ausência de erros grosseiros ou outliers.

4 Considerações Finais

Visando a aplicação de metodologias de fácil utilização e que simplificasse o processo de verificação da acuracidade tridimensional de um TLS realizou-se a proposta de utilização de uma peça pré-fabricada, composta por uma placa de esferas 3D com nove furos, na qual foram alojadas nove esferas de poliacetal, fabricadas especialmente para aplicação do método, cujo raio foi aferido com precisão ao nível do centésimo de milímetro.

A proposta de determinação da acurácia a partir das distâncias entre as esferas na nuvem de pontos, quando comparadas às distâncias nominais, mostrou-se um bom método de verificação tridimensional, quando confrontado com a precisão esperada e definida pelo fabricante. Embora os cálculos da acurácia apresentados nas diferentes distâncias e velocidades de varredura não terem mostrado grandes oscilações, a metodologia proposta se mostrou eficiente quando realizadas medições em curtas distâncias, mostrando-se um método alternativo de fácil utilização e resultados rápidos.

A segunda metodologia proposta de cálculo da posição do scanner a partir das coordenadas conhecidas das esferas não se mostrou eficiente, uma vez que os resultados são sensíveis à rigidez da rede formada entre os alvos de referência e a posição do scanner, aumentando-se os desvios à medida que se aumentava a distância de varredura. Destaca-se ainda a limitação na identificação dos alvos esféricos à medida que se aumenta a distância de varredura, o que dificulta a determinação das coordenadas do centro de cada esfera. Mesmo nas distâncias curtas, os resultados alcançados mostraram erros superiores àqueles determinados pela análise das distâncias entre as esferas.

Avaliando-se a precisão dos valores observados para o TLS Faro Photon 80, verifica-se que os resultados apresentaram erros superiores à precisão nominal especificada pelo fabricante, justificada devido ao tempo de uso e por não ter sido submetido a uma calibração e aferição oficial, antes da coleta dos dados.

Visando uma melhor análise do método sugere-se em trabalhos futuros a varredura da peça em diferentes posições, bem como a partir de outros equipamentos, além de analisar os resultados em comparação com outros métodos já consolidados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Topografia e Geodésia do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP por ceder o espaço para execução dos experimentos; à empresa Alezi Teodolini pelo empréstimo do Laser Scanner Terrestre utilizado no experimento; ao CNPq pelo suporte parcial com bolsa de produtividade PQ2 N°402393/2009-0 para fabricação das peças de calibração.

Referências

- BOEHLER, W.; BORDAS, V.; MARBS, A. Investigating Laser Scanner Accuracy. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, part 5/C15, 2003. pp. 696-701. .
- CHOW, J. C. K., LICHTI, D.D., TESKEY, W. F., Self-calibration of the TRIMBLE (MENSI) GS200 terrestrial laser scanner. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK, 2010. pp. 161-166.
- COSARCA, C., JOCEA, A., SAVU, A., Analysis of errors sources in terrestrial laser scanner. Journal of Geodesy and Cadastre. 2009.
- GEMAEL, C., Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas. Curitiba, Editora da UFPR, 1994. 319p.
- KAASALAINEN, S., KROOKS, A., KUKKO, A., KAARTINEN, H. Radiometric calibration of terrestrial laser scanners with external reference targets. Remote Sens. 2009, 1, pp. 144–158.
- KERSTEN, Th., STERNBERG, H. and MECHELKE, K. Investigations into the accuracy behavior of the terrestrial laser scanning system MENSI GS 100. In Optical 3-D Measurement Techniques VII, A. Grün / H. Kahmen (Eds.), 2005. pp. 122 – 131.
- RESHETYUK, Y. Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners. Licentiate thesis in Geodesy. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden. 2006.

- RESHETYUK, Y. A unified approach to self-calibration of terrestrial laser scanning. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65, 2010. pp. 445-456.
- SCHULZ, T. Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy. A dissertation submitted to ETH ZURICH for the degree of Doctor of Sciences. 2007.
- SOUDARISSANANE, S., LINDENBERGH, R., MENENTI, M., TEUNISSEN, P., Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 66, 2011. pp. 389-399.
- WOLF, P. R., 1969. Horizontal position adjustment. Surveying and mapping, v. XXIX, n. 4, 1969. pp. 635-644.