



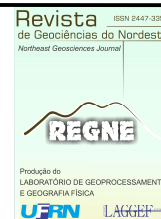
ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, n° 2 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n2ID36277>



Avaliação da precisão posicional de laser scanner terrestre utilizando um sistema de planos perpendiculares 3D

Evaluation of the positional accuracy of terrestrial laser scanner using a perpendiculars 3D plans system

Paulo Augusto Ferreira Borges¹; Edvaldo Simões da Fonseca Junior²; William Rodrigo Dal Poz³

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Campus Inconfidentes, Inconfidentes/MG, Brasil. Email: paulo.borges@ifsuldeminas.edu.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4792-8637>.

² Universidade de São Paulo, Escola Politécnica (EPUSP), Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo/SP, Brasil. Email: edvaldoj@usp.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4910-9109>.

³ Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, Viçosa/MG, Brasil. Email: william.dalpoz@ufv.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9532-3643>.

Resumo: Laser Scanner Terrestre (LST) são utilizados rotineiramente em diferentes aplicações de medição na engenharia de precisão. Devido ao desgaste, envelhecimento e deterioração dos componentes internos de um LST, surgem erros sistemáticos que afetam os parâmetros de calibração estabelecidos pelo fabricante, exigindo-se um novo processo de calibração dos parâmetros adicionais do LST. Neste caso, emprega-se a autocalibração, que demanda implantação de alvos fixos, exigindo um preparo prévio e minucioso. Assim, surge o interesse por metodologias de aferição de fácil utilização e manuseio, que permita quantificar e avaliar a qualidade e a acurácia de um LST. Este artigo apresenta a proposta de um método de aferição de LST com um sistema tridimensional de planos perpendiculares, onde a partir da nuvem de pontos dos diferentes planos pode-se obter a acurácia 3D do LST. Os resultados alcançados se mostraram satisfatórios e confiáveis. Para distâncias de varredura de 1, 3 e 5 metros nas resoluções de 1/2, 1/5 e 1/8 os valores RMS não ultrapassaram 2 mm para os eixos X e Y e ligeiramente superiores a 2 mm no eixo Z. Na distância de varredura de 10 metros e mesmas resoluções, os valores RMS para os eixos X e Y, ficaram acima de 2 mm, já para o eixo Z obteve-se RMS de 2,88 mm, 3,79 mm e 4,73 mm nas resoluções citadas, respectivamente. Observou-se a degradação do desempenho do LST para as distâncias de varredura de 15, 20 e 25 metros, com destaque para a resolução de 1/4 que apresentou um RMS menor.

Palavras-chave: Laser scanner terrestre; Nuvem de pontos; Erros Sistemáticos; Calibração; Precisão; Acurácia.

Abstract: Terrestrial Laser Scanner (LST) is routinely used in different measurement applications in precision engineering. Due to wear, aging, and restrictions on the internal components of an LST, systematic errors arise that impair the calibration parameters prescribed by the manufacturer, requiring a new process of deleting additional LST configurations. In this case, self-calibration is used, which involves the implementation of fixed targets, requiring prior and thorough preparation. Thus, there is an interest in easy-to-use and apply measurement methodologies, which allow quantifying and evaluating the quality and precision of an LST. This article proposes a method for calibration of LST with a three-dimensional system of perpendicular planes, where the 3D accuracy of the LST can be obtained from the point cloud of different planes. The results were achieved with confidence and trust. For scanning distances of 1, 3, and 5 meters in resolutions of 1/2, 1/5, and 1/8, the RMS values did not exceed 2 mm for the X and Y axes and exceeded 2 mm for the Z axis. For distances of 10 meters and the same resolutions, the RMS values for the X and Y axes were above 2 mm, while for the Z axis, RMS values of 2.88 mm, 3.79 mm, and 4.73 mm were obtained in the above resolutions. Note the performance degradation of LST for scanning distances of 15, 20, and 25 meters, with emphasis on the 1/4 resolution which presented a lower RMS.

Keywords: Terrestrial laser scanner; Cloud of points; Systematic Errors; Calibration; Precision; Accuracy.

Recebido: 14/05/2024 Aceito: 05/07/2024; Publicado: 22/10/2024

1. Introdução

O uso de Lasers Scanners Terrestres (LST) tem se mostrado um método altamente preciso e eficiente na aquisição de informações tridimensionais de objetos com alta densidade de dados. As características e capacidades dos modernos sistemas LST abriram ao mercado novos campos de aplicação, desde as geociências até a indústria cinematográfica (CHOW, LICHTI e TESKEY, 2010). A aplicação dos LST nas geociências aumentou rapidamente nas últimas duas décadas, incluindo aplicação na geologia, sismologia, riscos naturais (natural hazards), geomorfologia e glaciologia (TELLING et al., 2017).

Estes equipamentos se sobressaem devido à alta acurácia obtida nos levantamentos, podendo alcançar níveis de precisão na casa do centésimo do milímetro, precisão esta observada nos rastreadores industriais e braços articulados frequentemente utilizados para aplicações de inspeção e projeto de engenharia reversa em diferentes áreas industriais como a aeroespacial, defesa, automotiva e energia renovável. Cita-se ainda a não necessidade de refletores para a coleta das distâncias aos objetos, além da alta resolução, gerando-se densas nuvens de pontos com taxas que alcançam até 2 milhões de pontos/s (FARO, 2022).

Para gerar coordenadas tridimensionais (x, y, z) de pontos sobre uma superfície, os LST emitem pulsos de laser com o auxílio de um espelho de varredura. Esse pulso laser atinge o objeto e parte dessa energia volta para o sistema, permitindo o cálculo da distância.

Quando a distância é determinada através do intervalo de tempo entre a emissão e o retorno do pulso, é chamada de medição por tempo de percurso direto ou *time-of-flight* direto (SHAN e TOTH, 2017). Cita-se ainda o método FMCW (Frequency-Modulated Continuous Wave), inicialmente desenhado para ser utilizado em radares. Segundo Hancock (1999), trata-se de um método baseado na modulação da amplitude de um sinal emitido através da variação da frequência. O sinal emitido é modulado por uma onda senoidal com uma frequência variável que se “mistura” com a frequência refletida. A frequência mista passa por um filtro passa-baixa, e assim, a distância é obtida através da medição da frequência de batimento resultante. Atualmente a maior parte dos LST comerciais utilizam do método AMCW (Amplitud-Modulated Continuous Wave), os quais operam através da modulação da energia eletromagnética emitida a partir de uma onda senoidal em uma dada frequência. Trata-se de um método de comparação de fase ou a medida da defasagem entre a onda emitida e a onda de retorno.

O nível de precisão de um LST está vinculado ao alinhamento dos componentes óptico mecânicos internos ou dos parâmetros de calibração que compensam os erros sistemáticos. Estes parâmetros são calculados a priori pelo fabricante, que calibra o equipamento antes do envio ao usuário final. Com o decorrer do uso, devido ao desgaste, envelhecimento, variações de temperatura e consequente deterioração do LST, a posição relativa de seus componentes internos muda com o tempo, resultando em erros sistemáticos que excedem a precisão listada nas especificações, devendo o equipamento ser submetido a calibrações regulares para atualizar os parâmetros de calibração (QIAO e BUTT, 2023).

Telling et al. (2017) destaca a importância da manutenção periódica (anual) dos LST, contemplando a verificação e calibração para aplicação nas geociências, pois, nesses casos, os sistemas LST são regularmente transportados e instalados em terrenos acidentados e ambientes mais adversos. Embora os LST sejam instrumentos precisos, eles apresentam inevitáveis erros nas medições. Estes erros são oriundos principalmente de distorções nos mecanismos de movimento, erros no diodo de medição, erros de processamento no *software* interno e outros erros causados por efeitos dinâmicos e pelas condições ambientais (QIANG e WEI, 2009).

Entre as diferentes fontes de erros, cita-se (BOEHLER, BORDAS e MARBS, 2003): erros instrumentais (diâmetro do feixe laser, resolução, efeito de bordas, erro linear, erro angular e erros nos sistemas de eixos); erros relacionados à forma e à natureza dos objetos escaneados (refletância da superfície com ocorrência de multicaminhamento); erros causados pelas condições ambientais do local da varredura (temperatura, condições atmosféricas – presença de neblina ou poeira, interferência por radiação).

Resultados de calibração com diferentes LST e metodologias variadas, podem ser encontrados em contribuições de vários autores, como exemplo, Qiao e Butt (2023); Shi, Muralikrishnan e Sawyer (2020); Zhou et al. (2020); Holst et al. (2016); Soudarissanane et al. (2011), Reshetnyuk (2010), Kaasalainen et al. (2009), Kersten, Sternberg e Mechelke (2005); Boehler, Bordas e Marbs (2003).

Alguns trabalhos apresentados por Lichti (2007, 2008 e 2010) e Chow, Lichti e Teskey (2010) propuseram a modelagem dos erros sistemáticos utilizando uma autocalibração, obtida a partir da coleta de observações redundantes sobre vários alvos fixos, posicionando 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 foram denominados de parâmetros adicionais, os quais são estimados a partir das observações aplicando um ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). As vantagens da utilização da autocalibração de TLS incluem a otimização

da estimativa de todas as variáveis do modelo, sem a necessidade de equipamentos especiais nem 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 autocalibração de TLS são apresentadas com algumas variações. Reshetyuk (2006) propôs 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 são determinadas a partir do uso de uma estação total ou são estimadas a partir do ajustamento por MMQ.

Medić, Kuhlmann e Holst (2021), analisaram diferentes estratégias para a calibração de LST, propondo uma análise dos resultados da calibração realizada pelo fabricante, com duas calibrações realizadas pelo usuário que utilizaram alvos fixos e pontos de controle conhecidos. Os resultados demonstraram que as calibrações realizadas pelo usuário podem substituir a calibração de fábrica, desde que se utilizem uma lista de parâmetros de calibração abrangente, diminuindo-se os custos de manutenção e garantindo a precisão necessária às aplicações dos usuários finais.

Qiao e Butt (2023) propuseram um algoritmo de calibração autônomo para LST, baseado na utilização de correção por planos, facilmente encontrados em ambientes urbanos e que não necessitam de preparação manual prévia. Os parâmetros de calibração do scanner são estimados e atualizados minimizando as distâncias normais entre os planos, com base em uma técnica de comparação entre as nuvens de pontos, denominada M3C2. Diferentemente das abordagens baseadas em alvos ou pontos de controle, foram necessários apenas dados de varredura dos planos com média resolução. O estudo utilizou dois LST de alta precisão, Leica RTC360 e Z+F Imager 5016, e os resultados alcançados se mostraram consistentes com as técnicas de calibração baseada em alvos. Foram calculados 10 parâmetros de calibração a partir de um modelo de erro geométrico desenvolvido pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) dos EUA, e os resultados estimados pelo algoritmo proposto, apresentaram variações dentro de ± 3 sigmas quando comparado com a calibração com alvos, porém com desvios padrões menores.

As diferentes abordagens de calibração aqui descritas mostram a importância de definir e implantar metodologias que permitam quantificar e avaliar a qualidade e a acurácia dos sistemas lasers scanners terrestres e os diferentes erros inerentes ao equipamento ou ao processo de medição, visando certificá-los, atestando ou não sua conformidade com a precisão nominal definida pelos fabricantes. Este artigo apresenta os resultados da proposta de uma metodologia de avaliação da acurácia tridimensional de laser scanner terrestre a partir do uso de uma peça em aço com três faces planas e perpendiculares, formando-se um sistema de eixos tridimensionais (x, y, z). Definindo-se o sistema de referência da nuvem de pontos coincidente com a intersecção dos três planos, pode-se avaliar os valores dos desvios padrões obtidos para os três eixos (σ_x , σ_y e σ_z) calculados a partir de uma densa nuvem de pontos para cada face plana.

2. Metodologia

O fluxograma da Figura 1 ilustra as etapas para execução do trabalho, resumindo a metodologia empregada, desde a calibração da peça, varredura das cenas, processamentos de dados e análise dos resultados.

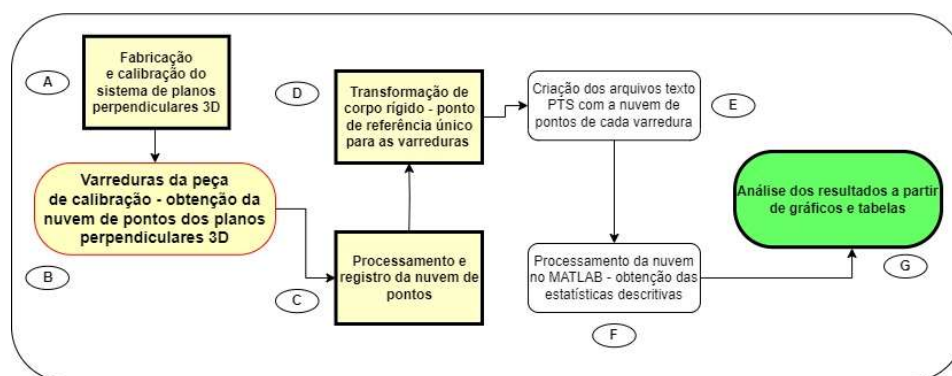


Figura 1 – Fluxograma com a metodologia de coleta e tratamento dos dados.

Fonte: Autores (2024).

2.1. Fabricação e calibração do sistema de planos perpendiculares 3D

Para a implementação deste método, construiu-se uma peça tridimensional em aço composta por três faces planas perpendiculares entre si, com dimensões de 15,875mmx500,000mmx500,000mm, conforme ilustra a Figura 2.

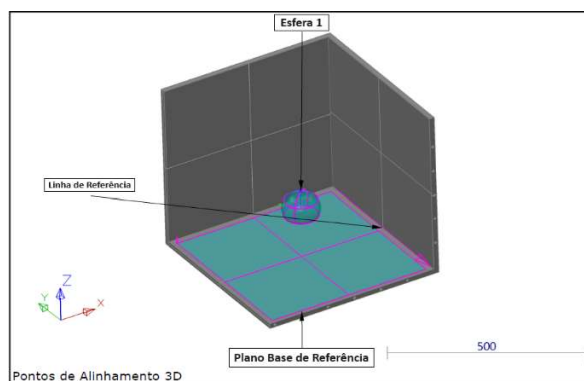


Figura 2 – Esquema mostrando as três faces perpendiculares da peça tridimensional fabricada para a aferição de LST.
Fonte: Autores (2024).

No processo de usinagem garante-se uma precisão planar na ordem do centésimo de milímetro. A montagem das três faces planas foi realizada de forma a definir três planos perpendiculares, os quais foram utilizados para a determinação do erro tridimensional (eixos X, Y e Z) de um LST. Mesmo se tratando de um processo de usinagem de alta precisão, o qual segue rígidos padrões de controle de qualidade, tornou-se conveniente efetuar a calibração da peça 3D utilizando-se um equipamento com precisão superior ao nível de precisão de um LST. Assim, utilizou-se neste processo 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. O objetivo da calibração foi determinar a distância de cada plano para o centro de uma esfera de poliacetal com diâmetro nominal de 100 mm, posicionada no centro da peça que define o plano horizontal (eixo Z), bem como avaliar a perpendicularidade entre os planos, conforme ilustra a Figura 3. Na Tabela 1 têm-se as especificações de precisão do equipamento utilizado:

Tabela 1 – Especificações técnicas do braço de medição portátil.

Modelo	Alcance de Medição	Repetitividade Ponto Apalpação	Acurácia Volumétrica	Peso do Braço (incluindo a base)
7125	2,5 m (8.2 ft)	0,050 mm (0.0020 in)	0,069 mm ³ (0.0027 in)	7,9 kg (17.42 lb)

Fonte: Autores (2024).

Observa-se que o equipamento possui uma precisão de 5 centésimos de milímetro apresentando, portanto, precisão bem superior a um equipamento LST.

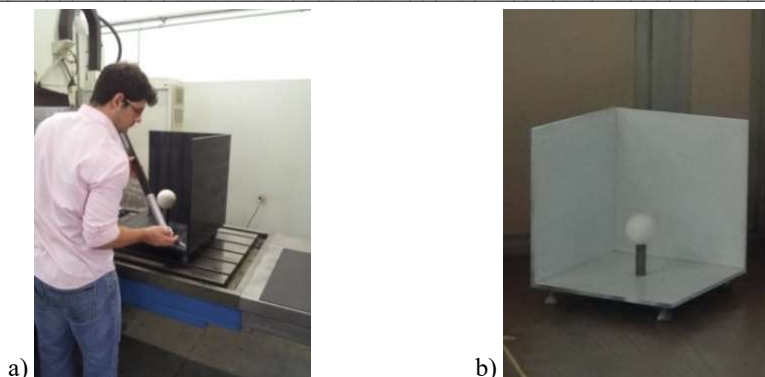


Figura 3 – a) Profissional executando os serviços de aferição da peça 3D fabricada para calibração de LST. b) Peça preparada para o processo de varredura após ser pintada na cor branca.

Fonte: Autores (2024).

Após o processo de calibração, determinaram-se as distâncias nominais entre o centro da esfera para cada face, obtendo-se os valores ΔX , ΔY e ΔZ de referência. Determinou-se ainda a perpendicularidade entre os eixos, de forma a garantir que a variação de distância referente a cada eixo para o centro da esfera se mantenha constante com precisão ao nível do centésimo de milímetro. Os valores obtidos após a calibração são apresentados nas Tabelas 2 a 5 a seguir.

Tabela 2 – Determinação do diâmetro nominal (mm) da esfera de referência.

		Tolerância superior.	Tolerância inferior	Nominal	Medido	Desvio
Diâmetro		0,100	-0,100	100,000	100,024	0,024
Centro	X	0,100	-0,100	0,000	0,000	0,000
	Y	0,100	-0,100	0,000	0,000	0,000
	Z	0,100	-0,100	0,000	0,000	0,000

Fonte: Autores (2024).

Número de pontos capturados: 5

Tabela 3 – Determinação da distância nominal do centro da esfera ao plano Z.

Referência - Alinhamento Geométrico PLP 1 (Valores em mm)						
		Tolerância Superior	Tolerância Inferior	Nominal	Medido	Desvio
Ponto A1	Z	0,200	-0,200	-147,690	-147,692	0,002
Ponto A2	Z	0,200	-0,200	-147,690	-147,692	0,002
Ponto A3	Z	0,200	-0,200	-147,690	-147,692	0,002
Ponto A4	Z	0,200	-0,200	-147,690	-147,692	0,002

Fonte: Autores (2024).

Referência: PLP 1 (Plano Principal 1 usado no alinhamento inicial do braço robótico)

Tabela 4 – Determinação da distância nominal do centro da esfera ao plano Y e do desvio angular do plano Y para o plano Z

Ângulo entre Plano Z / Plano Y – Referência: Plano Base Ref. (Plano Z)						
		Tolerância Superior	Tolerância Inferior	Nominal	Medido	Desvio
Ângulo		0,100°	-0,100°	90,000°	89,965°	-0,035°
Referência - Alinhamento Geométrico Plano Z (Valores em mm)						
		Tolerância Superior	Tolerância Inferior	Nominal	Medido	Desvio
Ponto B1	Y	0,200	-0,200	234,170	234,350	0,180
Ponto B2	Y	0,200	-0,200	234,170	234,077	-0,093
Ponto B3	Y	0,200	-0,200	234,170	234,088	-0,082
Ponto B4	Y	0,200	-0,200	234,170	234,357	0,187
Ponto B5	Y	0,200	-0,200	234,170	234,219	0,049

Fonte: Autores (2024).

Tabela 5 – Determinação da distância nominal do centro da esfera ao plano X e do desvio angular do plano X para o plano Z.

Ângulo entre Plano Z / Plano X – Referência: Plano Base Ref. (Plano Z)						
		Tolerância Superior	Tolerância Inferior	Nominal	Medido	Desvio
Ângulo		0,100°	-0,100°	90,000°	89,988°	-0,012°
Referência - Alinhamento Geométrico Plano Z (Valores em mm)						
		Tolerância Superior	Tolerância Inferior	Nominal	Medido	Desvio
Ponto C1	X	0,200	-0,200	235,050	234,947	-0,103
Ponto C2	X	0,200	-0,200	235,050	234,851	-0,199
Ponto C3	X	0,200	-0,200	235,050	235,213	0,163
Ponto C4	X	0,200	-0,200	235,050	235,118	0,068
Ponto C5	X	0,200	-0,200	235,050	235,032	-0,018

Fonte: Autores (2024).

As posições dos pontos medidos A1 a A4; B1 a B5 e C1 a C5 podem ser visualizadas nas Figuras 4a; 4b e 4c, respectivamente.

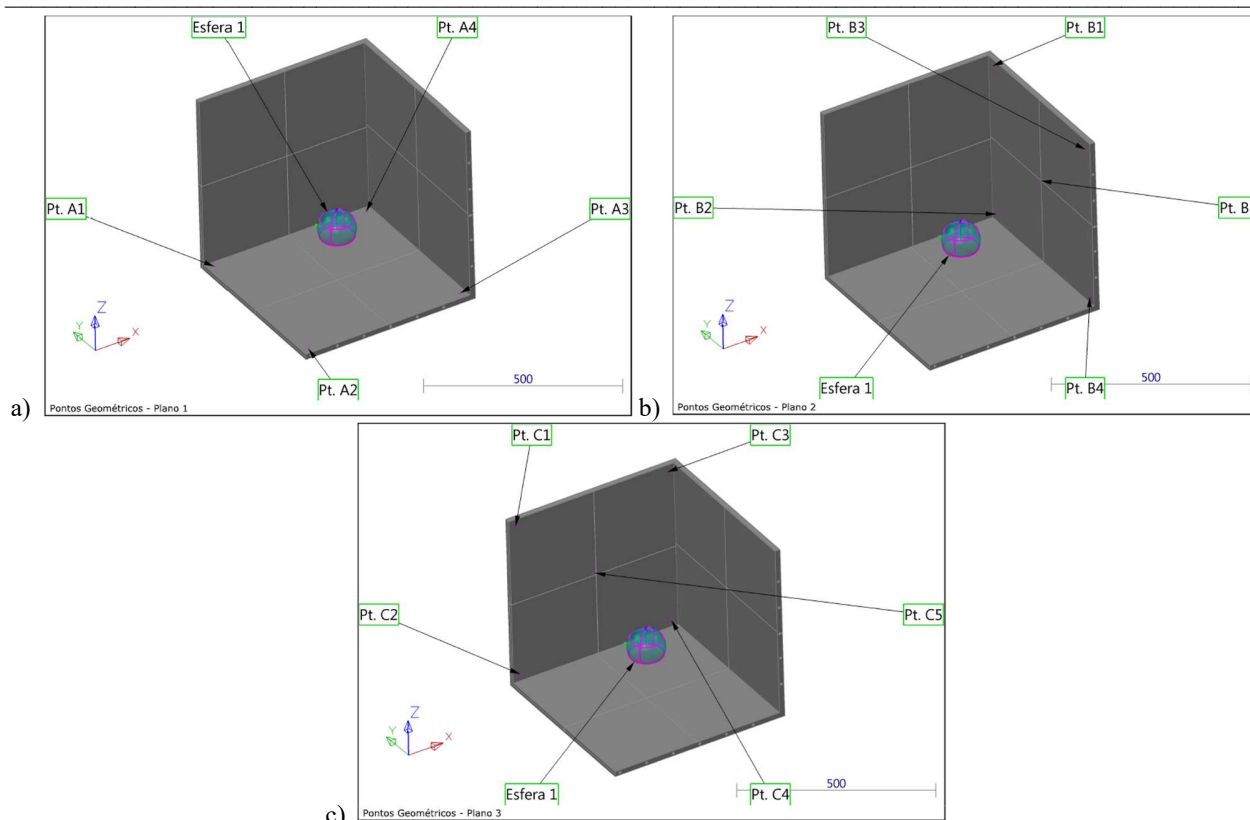


Figura 4 – a) Pontos medidos A1 a A4 sobre o Plano 1; b) Pontos medidos B1 a B5 sobre o Plano 2 e c) Pontos medidos C1 a C5 sobre o Plano 3.

Fonte: Autores (2024).

Na Tabela 2, obteve-se o diâmetro nominal da esfera e o respectivo desvio padrão, necessário para a análise das distâncias de varreduras do centro da esfera aos três planos perpendiculares. Nas tabelas 3 a 5 determinou-se as distâncias nominais entre o centro da esfera para cada um dos planos perpendiculares Z, Y e X, respectivamente, visando garantir a perpendicularidade entre eles.

Após o processo de calibração do sistema de planos e garantida a perpendicularidade entre os eixos com erros inferiores à precisão de um LST, realizou-se a varredura da peça para obtenção da nuvem de pontos em cada face plana.

2.2. Metodologia de coleta e processamento dos dados

Para avaliação da metodologia proposta realizou-se a calibração de um LST antigo, adquirido no ano de 2008 e com uso frequente, modelo Faro Photon 80 (FS80). Segundo o fabricante, as especificações técnicas do LST FS80 garantem um erro padrão de $\pm 2mm$ para a medição em distâncias de até 25 metros, e uma resolução angular horizontal e vertical de $\pm 0,009^\circ$.

Para o processo de varredura tridimensional da peça de calibração, definiram-se sete diferentes distâncias para o posicionamento do LST a ser aferido: 1, 3, 5, 10, 15, 20 e 25 metros. Para as distâncias de 1 a 10 metros realizou-se 3 varreduras com o LST FS80 configurando-se diferentes resoluções: 1/2, 1/5 e 1/8 da resolução máxima do equipamento que é de 120.000 pontos por segundo. Devido ao tamanho da peça de calibração, optou-se por realizar a varredura com resolução máxima 1/1, além das resoluções de 1/2 e 1/4 para as distâncias de 15, 20 e 25 metros, alterando-se também o posicionamento da peça de calibração, visando minimizar a influência do ângulo de incidência do feixe laser sobre o plano horizontal da peça, correspondente ao eixo z, conforme ilustra a Figura 5:

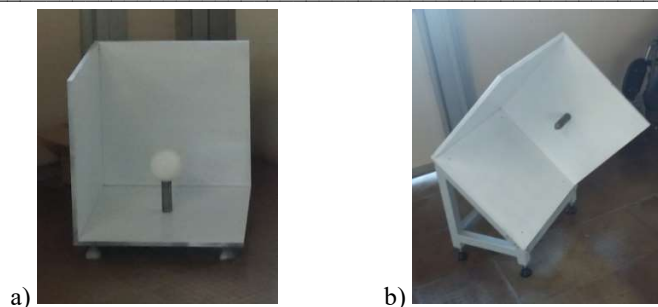


Figura 5 – a) posicionamento horizontal para varreduras de 1 a 10 metros. b) posicionamento em 45° para varreduras de 15, 20 e 25 metros.

Fonte: Autores (2024).

Uma vez realizada a varredura, a interseção entre os três eixos do LST é utilizada como ponto de referência para a determinação das coordenadas de cada vértice na nuvem de pontos (Figura 6). Para este ponto de referência têm-se as coordenadas X, Y e Z arbitradas para o valor zero.

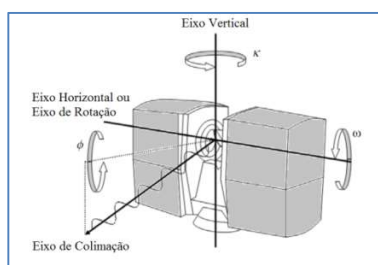


Figura 6 – Eixos de um LST e ângulos de orientação.

Fonte: Lichti (2010).

Visando facilitar o processo de calibração, optou-se por transferir o ponto de referência de cada varredura para um ponto em comum, neste caso, a intersecção das três faces planas da peça de calibração, ajustando-se cada face da peça ao seu respectivo plano de referência no novo sistema de eixos x, y e z. Este processo consiste em uma transformação de corpo rígido com três rotações e três translações, sem escala, e foi realizado no *software* de processamento e registro Faro Scene Versão 4.8.4.26611. Desse modo, a nuvem de pontos de cada face da peça, passa a apresentar coordenadas próximas ao seu eixo de origem, ou seja, ao valor zero. Para isso utilizou-se a ferramenta de reconhecimento e ajuste automático de planos. Neste processo, definiu-se um polígono sobre cada face plana da peça de calibração, a partir do qual determinou-se os planos X, Y e Z na nuvem de pontos. Em seguida definiu-se os três planos de referência (Figura 7) a partir dos valores normais teóricos, a serem utilizados para o posicionamento da nuvem de pontos a partir da nova referência.

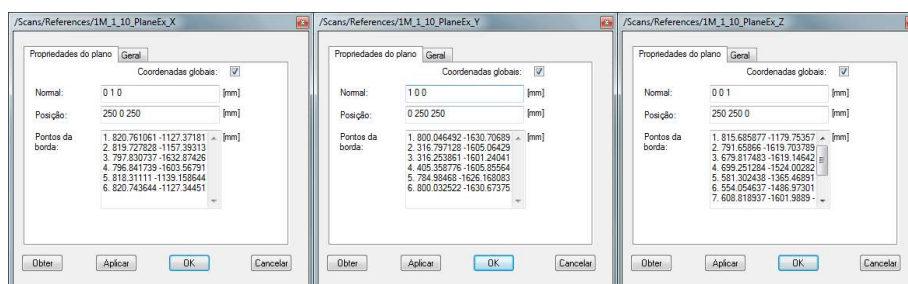


Figura 7 – Valores normais teóricos para os três planos de referência. FONTE: Software Faro Scene Versão 4.8.4.26611.

Fonte: Autores (2024).

A Figura 8 ilustra os resultados deste processo para uma das varreduras do LST.

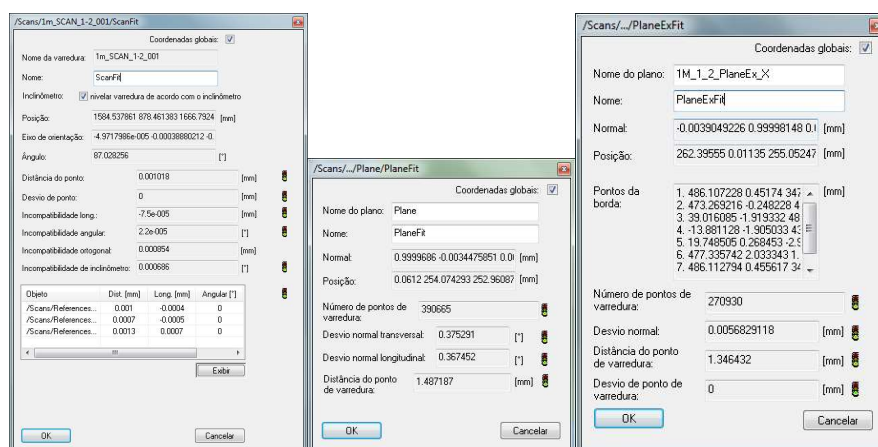


Figura 8 – Resultados do processo de registro da nuvem de pontos para a nova referência.

Fonte: Software Faro Scene Versão 4.8.4.26611.

O desvio padrão da normal, que é determinado utilizando-se os resultados preliminares do ajuste, permite indicar se uma área selecionada é ou não tão plana quanto deveria ser. Um desvio padrão alto indica que pode haver uma ondulação ou outros objetos no plano escolhido. No *software* Faro Scene este desvio padrão é dividido em um desvio transversal e um longitudinal. A qualidade desse critério indicará valores adequados quando for menor que 1.15° e valores inaceitáveis quando for maior que 2.29° . Observando-se a Figura 8 à direita, destaca-se a distância média de 1,346432 mm dos pontos de varredura ao plano, utilizado como um ótimo indicativo para a medição de ruídos. Observa-se ainda um baixíssimo erro entre o plano teórico e o plano médio gerado pela nuvem de pontos, denominado desvio normal, com valor de 0,005658 mm, comprovando a qualidade na fabricação do sistema de planos perpendiculares usado na aferição.

Ao examinar uma distribuição amostral simétrica ou aproximadamente simétrica, nota-se que geralmente, eles são mais frequentes perto de um valor central e mais raros ao afastar-se deste. A obtenção deste valor central é de suma importância nos levantamentos amostrais. Assim, optou-se pelo cálculo dos valores de média aritmética, mediana e moda. Para análise das variações em torno da medida central, calculou-se a variância amostral, desvio padrão amostral, máximo, mínimo, curtose, assimetria, amplitude e RMS.

Com o objetivo de eliminar possíveis erros grosseiros em cada amostra, adotou-se como critério de rejeição de possíveis observações atípicas (outliers), o algoritmo de estimação robusto chamado *Danish method* (método Dinamarquês) que é caracterizado por uma melhor detecção de erros grosseiros e rápida convergência (JORGENSEN et al., 1985; KUBIK; WENG e FREDERIKSEN, 1985, apud RESHETYUK, 2006). Neste algoritmo, calculam-se pesos para cada uma das observações a partir da equação 1 a seguir.

$$P_j = \begin{cases} 1 & \text{se } |v_j| < K \cdot \sigma_{v_j} \\ \exp\left(-\frac{v_j^2}{K \cdot \sigma_{v_j}^2}\right) & \text{se } |v_j| \geq K \cdot \sigma_{v_j} \end{cases} \quad (1)$$

Onde, v_j e σ_{v_j} são os resíduos (valores observados para cada plano) da j -ésima observação e seu respectivo desvio padrão, calculado a partir de toda a amostra.

Segundo Reshetyuk (2006), a constante K é definida com o valor 3, seguindo critérios práticos de identificação de outliers. Após o cálculo da matriz P_j , se os valores obtidos forem todos iguais a 1, há a indicação de que nenhum outlier foi detectado, caso contrário eliminam-se as observações que não atenderam ao critério na primeira iteração, e realiza-se um novo cálculo das estatísticas.

Por se tratar de um processo iterativo o cálculo inicial da média e desvio padrão a serem utilizados na primeira detecção de outliers, é feito diretamente com os dados originais, assim os valores das estatísticas descritivas iniciais podem estar contaminados por dados muito discrepantes. Assim, visando uma rápida convergência, antes de iniciar a iteração pelo

método Dinamarquês, fez-se uma primeira filtragem dos dados, onde, em função do número de amostras de cada nuvem de pontos nos respectivos eixos, calculou-se o valor k da quantidade de sigmas necessária para que apenas um valor da amostra ficasse fora do intervalo, sendo este o valor inicial utilizado (uma única vez), em substituição ao valor $k = 3$. Como primeiro critério de rejeição de valores observados L_i , calcularam-se as estatísticas eliminando-se as observações que apresentaram os seguintes valores em torno da média $\bar{\mu}$: $L_i < \bar{\mu} - k * \sigma_{Li}$ ou $L_i > \bar{\mu} + k * \sigma_{Li}$, onde σ_{Li} corresponde ao valor do desvio padrão obtido para toda a amostra (número total de observações).

A Tabela 6 apresenta os valores para a quantidade k de sigmas usados na primeira filtragem, calculados em função do número de amostras em cada nuvem de pontos.

Tabela 6 – Valores de k correspondentes ao número total de cada amostra.

Resolução	Distâncias (m)	Valor k - Eixo X	Valor k - Eixo Y	Valor k - Eixo Z	Amostras em X	Amostras em Y	Amostras em Z
1:1	15	4,08	4,10	3,53	22548	25044	2512
	20	3,75	3,95	3,28	5787	13150	994
	25	3,86	3,83	2,82	9088	7931	215
1:2	1	4,70	4,60	4,71	401748	248205	413131
	3	4,44	4,41	4,32	111932	93065	64354
	5	4,25	4,22	4,03	47535	42516	18313
	10	3,95	3,93	3,49	13101	11936	2173
	15	3,76	3,75	3,15	6040	5803	633
	20	3,61	3,60	2,68	3344	3254	141
	25	3,50	3,48	2,22	2237	2044	39
1:4	15	3,34	3,37	3,35	1137	1270	1191
	20	3,17	3,17	3,18	637	642	665
	25	3,02	3,07	3,01	386	446	369
1:5	1	4,31	4,21	4,33	63827	40131	67866
	3	4,02	3,98	3,88	17466	14904	9894
	5	3,81	3,79	3,57	7425	6811	2862
	10	3,49	3,45	2,60	2173	1808	112
1:8	1	4,10	3,99	4,11	24610	15369	25909
	3	3,79	3,74	3,64	6780	5681	3718
	5	3,58	3,54	3,30	2953	2585	1049
	10	3,22	3,19	1,94	814	733	20

Fonte: Autores (2024).

Na sequência, com os dados da amostra após a primeira filtragem, aplicou-se o método Dinamarquês, de forma iterativa, recalculando-se as estatísticas descritivas após cada iteração e realizando-se a análise do critério de rejeição até que nenhum outlier fosse detectado.

Com o objetivo de avaliar a normalidade dos dados, geraram-se as curvas de distribuição normal e os histogramas de frequências bem como os gráficos quantil-quantil plot ou q-q plot para todas as varreduras. Observando-se a quantidade de pontos em cada nuvem de pontos através da Tabela 6, observa-se uma quantidade muito grande de amostras, o que impossibilitou a aplicação de testes estatísticos como, por exemplo, o teste Shapiro Wilk, uma vez que o tamanho da amostra deve estar entre 3 e 5000 pontos. Outros testes estatísticos foram avaliados, utilizando-se o *software* MATLAB e o pacote “*nortest*” no *software* R, como os testes Anderson-Darling, Jarque-Bera Robusto e Lilliefors. Entretanto, para todos eles as estatísticas calculadas apresentaram o valor p muito pequeno, devido ao tamanho da amostra ser muito grande, inviabilizando a aplicação.

Segundo Miot (2016) as análises da normalidade baseadas nos diagramas Q-Q plot tornam-se confiáveis para amostras de grande dimensão (> 5.000 unidades), quando os testes de normalidade inflacionam sobremaneira o erro tipo II (ocorrendo perda de sensibilidade). O autor aponta que diversos testes estatísticos podem ser aplicados para verificação da normalidade dos dados a partir de diferentes pressupostos e algoritmos, onde todos pressupõem a hipótese de normalidade

dos dados (H_0) a partir da adoção de um valor $p > 0,05$, para que haja aderência aos parâmetros de normalidade. Um estudo detalhado com considerações sobre os valores de p vinculados ao teste de significância de hipótese nula podem ser obtidos em Ioannidis (2019).

O gráfico qq-plot possui seus eixos construídos de forma a visualizar um contraste entre os quantis teóricos de uma distribuição (sendo neste caso realizada a análise com a distribuição normal) com os quantis observados a partir do conjunto de dados coletados. Quanto mais os pontos se aproximam da reta de 45° , mais próxima é a distribuição dos dados em relação à distribuição estudada.

Para análise da normalidade em todas as varreduras optou-se por testes sobre os valores de assimetria e curtose. Avaliando-se os valores de curtose ou achatamento pode-se medir o grau de afilamento da curva relativamente à normal. As medidas de curtose permitem indicar a intensidade das frequências na vizinhança dos valores centrais, aproximando-se da média com valor zero. Uma curva leptocúrtica indica que a maioria dos valores observados se aproxima da média, tornando-se um indicativo de dados precisos.

Devido à grande quantidade de pontos na nuvem de cada plano, para a determinação das estatísticas, desenvolveu-se uma rotina de cálculo utilizando-se o *software* MATLAB® R2015a Versão 8.5.0.197613. O algoritmo permitiu a leitura dos arquivos textos em formato *.pts, exportados pelo *software* Faro Scene e os respectivos cálculos, bem como a geração das curvas de distribuição e os histogramas de frequências para os três eixos.

3. Resultados e Discussões

Finalizada a etapa de processamento e registro de todas as cenas, obteve-se uma nuvem de pontos para cada face plana da peça de calibração, onde os valores observados para as coordenadas X, Y e Z em cada nuvem se aproximaram do valor zero. Assim, as variações dos valores observados em relação ao valor zero de referência foram consideradas como sendo os erros atribuídos ao equipamento, permitindo-se uma avaliação por meio de estatísticas descritivas para cada nuvem de pontos.

Nas Tabelas 7 a 13 são apresentados os resultados obtidos em função da distância de varredura e nas diferentes resoluções, onde o número de observações refere-se ao número efetivamente utilizado, após a eliminação dos outliers.

Tabela 7 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 1 metro de distância.

Estatísticas	Resolução 1/2			Resolução 1/5			Resolução 1/8		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	0,0610	-0,0205	0,5410	0,0800	-0,0183	0,4837	0,1153	0,0084	0,5014
Desvio Padrão	1,8209	1,5338	2,3001	1,8175	1,4587	2,3139	1,7647	1,4770	2,3137
Variância	3,3158	2,3525	5,2903	3,3034	2,1277	5,3542	3,1141	2,1814	5,3532
Máximo	5,5000	4,5000	7,4000	5,5000	4,3000	7,4000	5,4000	4,4000	7,4000
Mínimo	-5,4000	-4,6000	-6,3000	-5,3000	-4,3000	-6,4000	-5,1000	-4,4000	-6,4000
Moda	0,1000	-0,1000	0,9000	0,5000	-0,2000	0,8000	0,4000	0,0000	0,5000
Mediana	0,1000	0,0000	0,6000	0,1000	0,0000	0,6000	0,2000	0,0000	0,6000
Curtose	2,7192	2,8522	2,9875	2,6210	2,9022	3,1827	2,6488	2,8734	3,1126
Assimetria	-0,1070	0,0176	-0,2003	-0,1233	0,0761	-0,1402	-0,1006	0,0545	-0,0889
Amplitude	10,9000	9,1000	13,7000	10,8000	8,6000	13,8000	10,5000	8,8000	13,8000
RMS	1,8219	1,5339	2,3628	1,8193	1,4588	2,3639	1,7684	1,4769	2,3674
Nº Observações	401080	247330	409810	63724	39915	67103	24587	15304	25697
Descartados	667	875	3318	103	216	763	23	65	212

Fonte: Autores (2024).

Para as varreduras realizadas na menor distância (1 metro), observa-se que a alteração da resolução de varredura, onde resoluções menores diminuem a quantidade total de observações, não impactaram de forma significativa no valor do desvio padrão obtido. As médias se apresentaram muito próximas do valor verdadeiro (zero) e os desvios padrões e o RMS para os eixos x e y ficaram menores que 2 mm (precisão nominal do LST FS80), apresentando um valor ligeiramente superior para o eixo z. Destaca-se ainda uma maior ocorrência de outliers para o eixo z nas três resoluções testadas.

Para a distância de varredura de 3 metros, os resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 3 metros de distância.

Estatísticas	Resolução 1/2			Resolução 1/5			Resolução 1/8		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	0,0333	0,0289	0,1325	-0,0045	0,0408	0,1803	0,0382	-0,0039	0,1395
Desvio Padrão	1,8398	1,8964	2,1666	1,8622	1,8708	2,2077	1,8458	1,8403	2,4492
Variância	3,3847	3,5963	4,6940	3,4677	3,4999	4,8739	3,4068	3,3868	5,9986
Máximo	5,5000	5,7000	6,6000	5,5000	5,6000	6,4000	5,5000	5,5000	7,1000
Mínimo	-5,4000	-5,6000	-6,3000	-5,4000	-5,5000	-6,2000	-5,4000	-5,5000	-7,2000
Moda	-0,3000	-0,2000	0,9000	-0,3000	0,2000	0,5000	-0,1000	0,1000	0,0000
Mediana	0,0000	0,0000	0,2000	-0,1000	0,0000	0,3000	0,0000	0,0000	0,2000
Curtose	2,7698	2,7547	2,4672	2,7686	2,7516	2,5445	2,8434	2,8038	2,4669
Assimetria	0,1164	0,0712	-0,1397	0,1250	0,0571	-0,1297	0,1541	0,1196	-0,0924
Amplitude	10,9000	11,3000	12,9000	10,9000	11,1000	12,6000	10,9000	11,0000	14,3000
RMS	1,8401	1,8966	2,1706	1,8621	1,8712	2,2149	1,8460	1,8402	2,4529
Nº Observações	111660	92882	64327	17427	14867	9884	6768	5662	3717
Descartados	267	183	26	39	37	10	12	19	1

Fonte: Autores (2024).

Nesta distância, os resultados obtidos para os desvios padrões se apresentam de forma similar às varreduras a 1 metro de distância, porém destaca-se uma maior aproximação das médias do eixo z ao valor verdadeiro (zero) bem como uma menor ocorrência de outliers neste eixo. Vale ressaltar que a distância de varredura impacta no ângulo de incidência do feixe laser sobre a peça de calibração, onde para o eixo z, os ângulos verticais ficam mais próximos do nadir quanto menor for a distância à peça de calibração. Caso haja erros sistemáticos no sistema de eixos e no sistema angular vertical do LST, as variações nesta direção ficarão mais evidentes, cuja melhoria é observada com o aumento da distância. Por outro lado, distâncias muito longas terão o impacto do ângulo de incidência sobre a peça de calibração (afastando-o da perpendicularidade), deteriorando a precisão conforme poderá ser observado nos resultados para a distância de 25 metros.

Na sequência, a Tabela 9 traz os resultados obtidos para a distância de 5 metros.

Tabela 9 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 5 metros de distância.

Estatísticas	Resolução 1/2			Resolução 1/5			Resolução 1/8		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	-0,0097	0,0014	0,2241	-0,0093	0,0941	-0,1193	-0,0447	0,0125	0,0033
Desvio Padrão	1,7442	1,9063	2,4618	1,6886	1,9230	2,7248	1,7713	1,9641	2,9805
Variância	3,0421	3,6342	6,0606	2,8514	3,6980	7,4246	3,1375	3,8579	8,8836
Máximo	5,2000	5,7000	7,6000	5,0000	5,8000	7,7000	5,0000	5,9000	7,5000
Mínimo	-5,2000	-5,7000	-7,1000	-5,0000	-5,6000	-7,9000	-5,3000	-5,8000	-8,6000
Moda	-0,4000	-0,1000	-0,2000	0,4000	0,4000	-1,6000	-0,5000	-0,8000	1,6000
Mediana	0,0000	0,0000	0,1000	0,0000	0,1000	-0,3000	0,0000	0,0000	0,1000
Curtose	2,8134	2,6938	2,6115	2,7961	2,6485	2,5819	2,8484	2,7198	2,5695
Assimetria	0,0066	-0,0199	0,0777	0,0345	-0,0395	0,1630	-0,0852	-0,0015	-0,0190
Amplitude	10,4000	11,4000	14,7000	10,0000	11,4000	15,6000	10,3000	11,7000	16,1000
RMS	1,7442	1,9063	2,4719	1,6885	1,9252	2,7270	1,7716	1,9638	2,9791
Nº Observações	47362	42449	18292	7395	6804	2856	2930	2575	1047
Descartados	173	67	21	30	7	6	23	10	2

Fonte: Autores (2024).

Nesta distância, os resultados obtidos para os desvios padrões também se apresentaram de forma similar às varreduras a 1 e 5 metros de distância, mantendo-se o baixo número de outliers. Porém com o aumento da distância e uma menor resolução do LST, observa-se uma deterioração da precisão do eixo z na varredura com resolução de 1/8. Neste caso o desvio padrão aumentou para próximo de 3 mm. Este efeito da diminuição da resolução, reflete na quantidade de pontos

totais sobre o plano, que somado aos efeitos discutidos nas distâncias anteriores para o eixo z, percebe-se uma degradação do desvio padrão neste eixo com a diminuição da resolução, saindo de 2,46 mm para a resolução de 1/2, passando para 2,72 mm na resolução de 1/5, e chegando a 2,98 mm na resolução de 1/8. Este comportamento também se repete para este eixo nas duas distâncias anteriores.

A seguir tem-se a Tabela 10, com os resultados para a distância de varredura de 10 metros.

Tabela 10 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 10 metros de distância.

Estatísticas	Resolução 1/2			Resolução 1/5			Resolução 1/8		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	0,0121	0,0431	-0,3029	0,0764	0,2043	-0,3411	0,1862	0,1949	-0,2800
Desvio Padrão	2,2526	2,4786	2,8682	2,4310	2,4951	3,7908	2,5338	2,6352	4,8475
Variância	5,0741	6,1436	8,2267	5,9099	6,2255	14,3700	6,4203	6,9444	23,4990
Máximo	6,7000	7,4000	8,3000	7,1000	7,5000	6,7000	7,5000	7,7000	8,7000
Mínimo	-6,7000	-7,2000	-8,9000	-7,0000	-7,1000	-8,6000	-7,0000	-7,6000	-9,4000
Moda	-0,1000	0,2000	-1,8000	-0,5000	0,0000	-0,7000	-0,2000	-0,3000	-7,1000
Mediana	0,0000	0,1000	-0,5000	0,1000	0,2000	-0,4500	0,2000	0,1500	0,0000
Curtose	2,8447	2,8081	3,3747	2,7846	2,8752	2,1538	2,9602	2,9393	2,3901
Assimetria	-0,0581	-0,0756	0,3941	0,0414	-0,0391	-0,0945	0,1072	0,1610	-0,1441
Amplitude	13,4000	14,6000	17,2000	14,1000	14,6000	15,3000	14,5000	15,3000	18,1000
RMS	2,2525	2,4789	2,8835	2,4316	2,5027	3,7892	2,5391	2,6405	4,7331
Nº Observações	13056	11896	2133	2075	1777	112	798	700	20
Descartados	45	40	40	97	31	0	16	33	0

Fonte: Autores (2024).

Com o aumento da distância de varredura para 10 metros, os resultados passam a ser afetados pela distância de varredura. Observa-se que para os eixos x e y, os desvios padrões passam a alcançar valores acima de 2 mm em todos os eixos, o que nas três varreduras anteriores estavam abaixo de 2 mm para os eixos x e y. Destaca-se a pouquíssima quantidade de pontos no eixo z quando se utilizou a resolução de 1/8. A degradação no eixo z passa a ser mais significativa, resultado da diminuição do ângulo de incidência, com valores de desvios saindo de 2,87 mm para a resolução de 1/2, passando para 3,79 mm na resolução de 1/5 e chegando a 4,85 mm na resolução de 1/8. Os valores das médias, no entanto, continuam muito próximas ao valor zero.

Como a quantidade de pontos, principalmente no eixo z, se tornou muito pequena à medida que se aumentava a distância de varredura, optou-se por realizar os experimentos nas distâncias de 15, 20 e 25 metros com as resoluções 1/1, 1/2 e 1/4, mantendo-se a resolução de 1/2 para todas as distâncias a fim de uma análise geral. Nas resoluções de 1/5 e 1/8 não havia pontos suficientes em todas as faces, impossibilitando a geração dos planos necessários para a o processamento e registro da nuvem de pontos na nova referência.

Destaca-se ainda a alteração da posição da peça de calibração, colocada em um ângulo de inclinação de 45°, o que permitiu minimizar o problema do ângulo de incidência do feixe laser, aumentando-se assim a quantidade de pontos para o eixo z. Os resultados obtidos para a distância de 15 metros para as três resoluções propostas, são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 15 metros de distância.

Estatísticas	Resolução 1/1			Resolução 1/2			Resolução 1/4		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	0,0252	0,2247	-0,0400	-0,2106	0,1968	-0,1243	-0,2874	0,2586	-0,3377
Desvio Padrão	2,4946	2,7111	3,0405	2,6773	2,7601	2,9086	2,0180	1,9434	2,3173
Variância	6,2231	7,3502	9,2445	7,1680	7,6180	8,4601	4,0725	3,7766	5,3699
Máximo	7,3000	8,3000	9,0000	7,8000	8,4000	8,3000	5,0000	5,5000	5,9000
Mínimo	-7,4000	-7,9000	-9,1000	-8,1000	-8,0000	-8,8000	-6,2000	-5,5000	-6,8000
Moda	0,2000	1,1000	1,0000	0,3000	-1,1000	-0,3000	-0,1000	-0,5000	0,4000
Mediana	0,1000	0,3000	0,1000	-0,1000	0,3000	0,0000	-0,1000	0,3000	-0,2000
Curtose	2,8469	2,8731	2,7533	2,8702	2,9049	2,8051	2,9043	2,8608	2,6401
Assimetria	-0,1095	-0,1625	-0,1721	-0,1113	-0,0969	-0,1807	-0,2764	-0,1576	-0,2413
Amplitude	14,7000	16,2000	18,1000	15,9000	16,4000	17,1000	11,2000	11,0000	12,7000
RMS	2,4947	2,7204	3,0407	2,6853	2,7668	2,9110	2,0375	1,9597	2,3408
Nº Observações	19826	22186	21201	4351	5257	5213	1130	1267	1190
Descartados	77	95	33	21	10	22	7	3	1

Fonte: Autores (2024).

Em uma primeira análise, destaca-se a maior quantidade de pontos no eixo z após a inclinação da peça. Enquanto na distância de 10 metros na resolução de 1/2 a quantidade total de pontos (utilizados + outliers) era de 2173 pontos, mesmo aumentando-se a distância para 15 metros, esta quantidade aumentou para 5235 pontos.

Na avaliação dos valores dos desvios padrões para a resolução de 1/2, observa-se uma precisão um pouco menor nos três eixos quando comparado à distância de 10 metros, refletindo a degradação em função do aumento da distância. Entretanto, com a inclinação da peça, observa-se uma melhoria na precisão nos três eixos quando se diminuiu a resolução de 1/1 para 1/4. Observando-se as práticas recomendadas pelo fabricante FARO do modelo do LST FS80, destaca-se que a resolução de 1/4 é recomendada à medida que se aumenta a distância, o que ficou evidenciado nos resultados deste experimento (FARO, 2024).

Para a distância de 20 metros, os resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 20 metros de distância.

Estatísticas	Resolução 1/1			Resolução 1/2			Resolução 1/4		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	-0,1261	0,2769	-0,0337	-0,2620	0,1569	0,0921	-0,0553	0,1614	0,3015
Desvio Padrão	3,4873	3,6630	4,1338	3,5466	3,7504	4,2001	2,8314	2,7008	3,4854
Variância	12,1610	13,4170	17,0880	12,5780	14,0660	17,6410	8,0168	7,2944	12,1480
Máximo	10,3000	11,2000	12,3000	10,0000	11,4000	12,2000	8,3000	7,2000	10,4000
Mínimo	-10,5000	-10,7000	-11,8000	-10,7000	-11,0000	-11,1000	-7,7000	-7,8000	-8,7000
Moda	-0,4000	-0,7000	0,3000	0,2000	-1,5000	-1,1000	-2,1000	0,7000	0,5000
Mediana	-0,2000	0,2000	-0,1000	-0,2000	0,2000	0,0000	-0,2000	0,0000	0,4000
Curtose	2,7721	2,7913	2,6970	2,8031	2,8437	2,6027	2,9818	2,7588	2,4193
Assimetria	0,0369	0,0113	0,0633	-0,0615	-0,0002	0,0652	0,3019	0,0709	-0,0816
Amplitude	20,8000	21,9000	24,1000	20,7000	22,4000	23,3000	16,0000	15,0000	19,1000
RMS	3,4894	3,6733	4,1338	3,5555	3,7531	4,2003	2,8297	2,7035	3,4958
Nº Observações	10442	11549	12197	2389	2840	2756	636	629	662
Descartados	17	29	25	10	2	4	1	13	3

Fonte: Autores (2024).

Aumentando-se a distância para 20 metros, os valores dos desvios padrões aumentam de forma significativa se aproximando de valores próximos a 4 mm nas resoluções 1/1 e 1/2, porém consideravelmente menores na resolução de 1/4.

Para a distância de 25 metros, os resultados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Estatísticas (em mm) obtidas para varreduras realizadas a 25 metros de distância.

Estatísticas	Resolução 1/1			Resolução 1/2			Resolução 1/4		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Média	-0,1389	0,0415	0,0182	0,2442	0,3890	0,1622	0,1026	0,3170	0,2027
Desvio Padrão	3,6974	3,8923	4,1725	3,7944	3,9888	4,1258	2,6669	2,7295	3,0995
Variância	13,6710	15,1500	17,4100	14,3970	15,9100	17,0220	7,1123	7,4500	9,6071
Máximo	10,8000	11,6000	12,5000	11,2000	11,5000	12,5000	7,0000	7,4000	7,6000
Mínimo	-11,0000	-11,6000	-12,2000	-10,4000	-11,4000	-12,2000	-7,1000	-7,1000	-8,7000
Moda	1,2000	-1,2000	-0,5000	-0,8000	-1,3000	0,6000	-0,6000	0,4000	-2,3000
Mediana	-0,1000	0,1000	0,0000	0,3000	0,4000	0,1000	0,0000	0,4000	0,3000
Curtose	2,7967	2,8244	2,8069	2,7434	2,8840	3,0665	2,6503	2,9958	2,7655
Assimetria	-0,0559	-0,0530	0,0155	-0,0245	-0,0463	0,0120	0,0244	-0,2056	-0,2322
Amplitude	21,8000	23,2000	24,7000	21,6000	22,9000	24,7000	14,1000	14,5000	16,3000
RMS	3,6997	3,8922	4,1723	3,8011	4,0065	4,1278	2,6654	2,7446	3,1020
Nº Observações	6727	7154	7272	1666	1665	1784	384	429	369
Descartados	31	48	16	6	11	0	2	17	0

Fonte: Autores (2024).

Por fim, observa-se valores ligeiramente superiores para os desvios padrões quando comparada à distância anterior de 20 metros, mantendo-se o padrão de melhoria na resolução de 1/4. De posse de todos os valores de desvio padrão amostral para cada distância de varredura e para cada resolução, visando uma representação visual do que foi discutido nos resultados das tabelas anteriores, gerou-se alguns gráficos para os três eixos x, y e z, apresentando a variação dos valores obtidos para cada eixo em função da distância de varredura, conforme Figuras 9, 10 e 11.

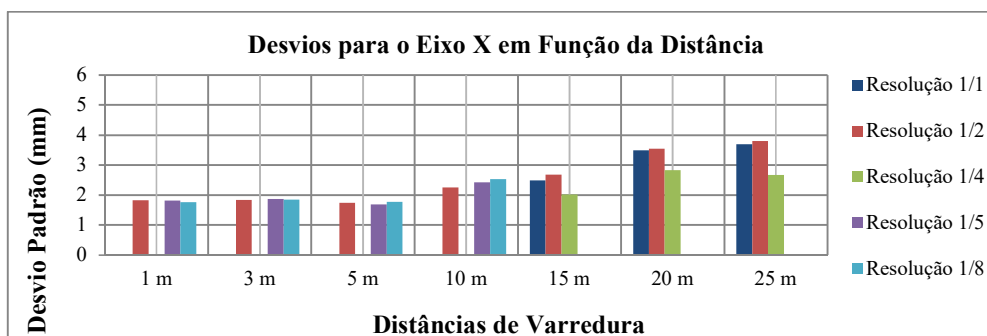


Figura 9 – Desvios padrões obtidos para o Eixo X nas diferentes varreduras.

Fonte: Autores (2024).

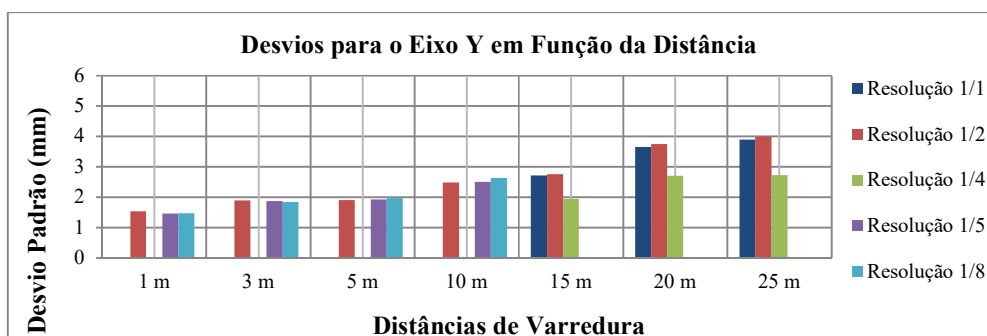


Figura 10 – Desvios padrões obtidos para o Eixo Y nas diferentes varreduras.

Fonte: Autores (2024).

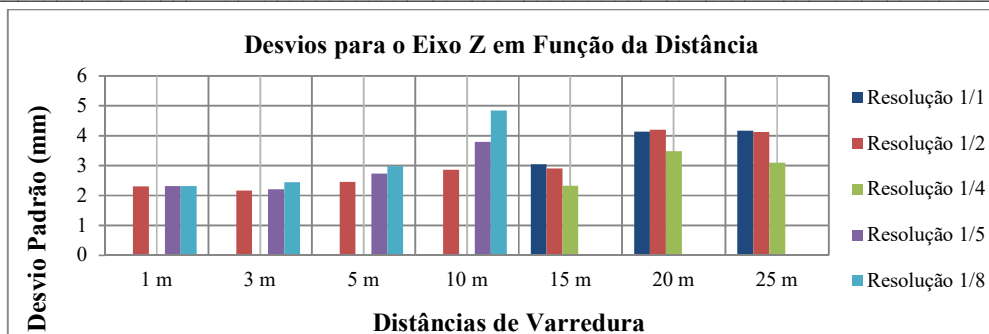


Figura 11 – Desvios padrões obtidos para o Eixo Z nas diferentes varreduras.
Fonte: Autores (2024).

Após a análise dos desvios para os três eixos observa-se que a proposta de calibração a partir do sistema de planos perpendiculares 3D se mostrou eficiente e apresentou resultados coerentes com as especificações do fabricante. Nas distâncias curtas de 1, 3 e 5 metros os desvios padrões para os eixos x e y se mostraram ligeiramente menores que a especificação nominal de erro de 2 mm do fabricante. No eixo z, nestas distâncias os desvios ficaram entre 2 e 3 mm. Para a distância de 10 metros, os desvios foram degradados apresentando valores entre 3 e 5 mm. Ao alterar a inclinação da peça e utilizando-se as melhores resoluções, houve uma melhoria de precisão principalmente na resolução de 1/4 com varredura a 15 metros. Observou-se também uma degradação na precisão à medida que as distâncias aumentavam para 20 e 25 metros.

Para análise da normalidade dos dados, calculou-se as curvas de distribuição normal, os histogramas de frequências e os gráficos q-q plot para todas as varreduras, mas foi escolhido apresentar aqui, por questões de síntese, apenas os gráficos obtidos para a resolução de 1/2, que foi utilizada para todas as distâncias.

Nas Figuras 12 e 13 são apresentadas as curvas de distribuição normal obtida para os três eixos nas distâncias de 1 a 25 metros.

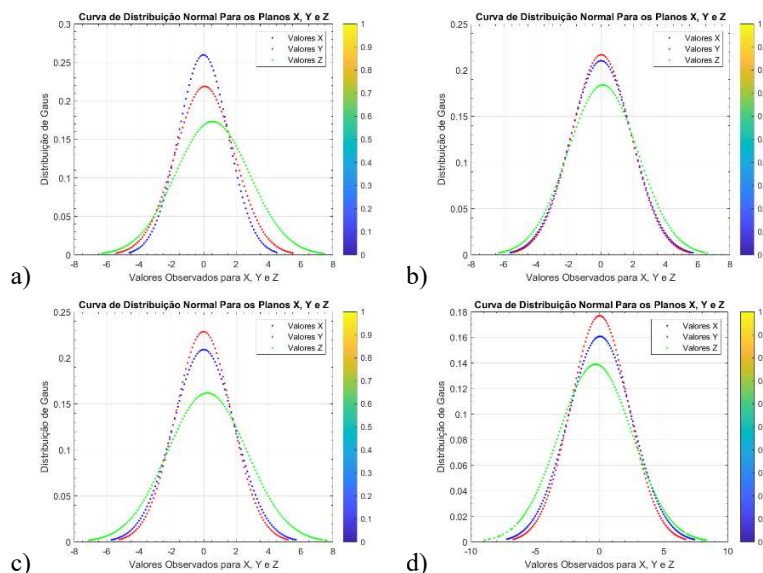


Figura 12 – Curva de distribuição normal obtida para os três eixos: a) varredura a 1 metro com resolução de 1/2; b) varredura a 3 metros com resolução de 1/2; c) varredura a 5 metros com resolução de 1/2 e d) varredura a 10 metros com resolução de 1/2.
Fonte: Autores (2024).

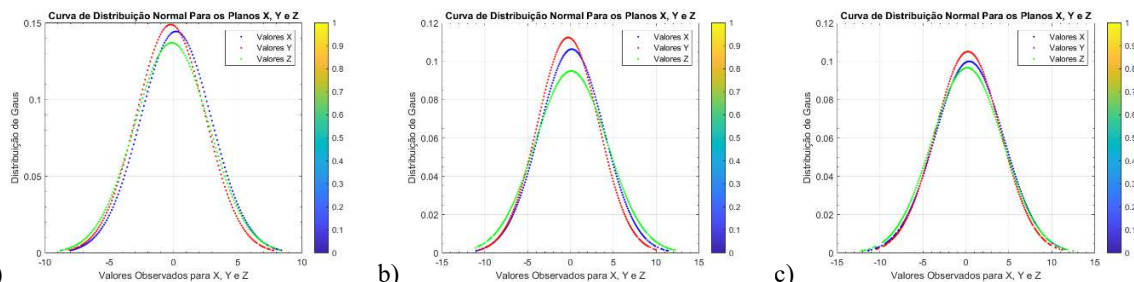


Figura 13 – Curva de distribuição normal obtida para os três eixos: a) varredura a 15 metros com resolução de 1/2; b) varredura a 20 metros com resolução de 1/2 e c) varredura a 25 metros com resolução de 1/2.

Fonte: Autores (2024).

Nas figuras 14 e 15 são apresentados os gráficos dos histogramas de frequências e QQ Plot obtidos para a varredura a 1 metro com resolução de 1/2.

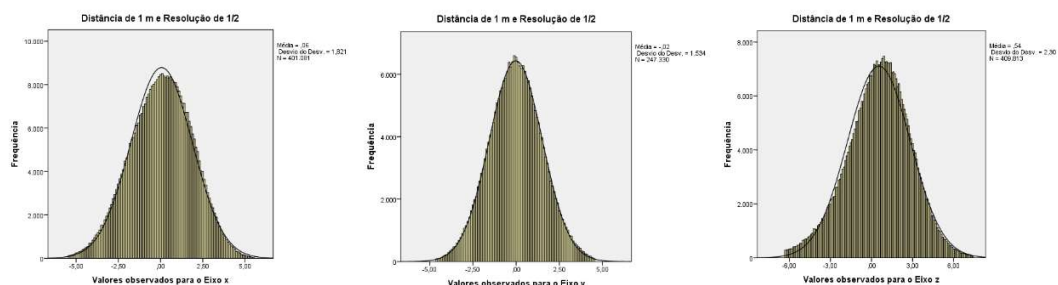


Figura 14 – Histogramas de frequências obtidos para os três eixos em varreduras realizadas à distância de 1 metro com resolução de 1/2.

Fonte: Autores (2024).

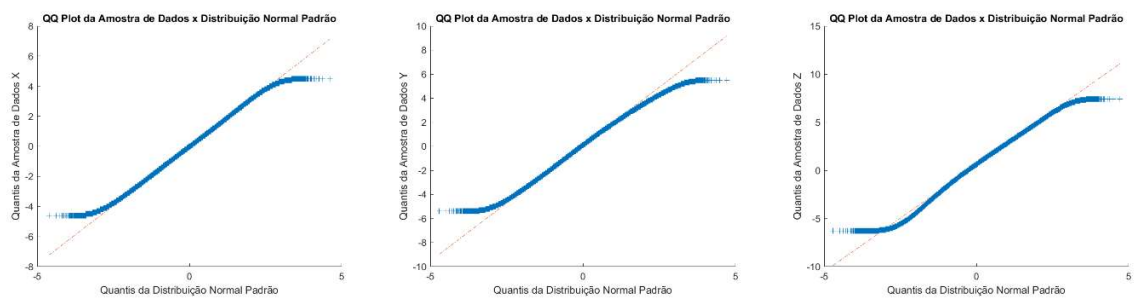


Figura 15 – Gráficos QQ Plot obtidos para os três eixos em varreduras realizadas à distância de 1 metro com resolução de 1/2.

Fonte: Autores (2024).

Nas figuras 16 e 17 são apresentados os gráficos dos histogramas de frequências e QQ Plot obtidos para a varredura a 25 metros com resolução de 1/2.

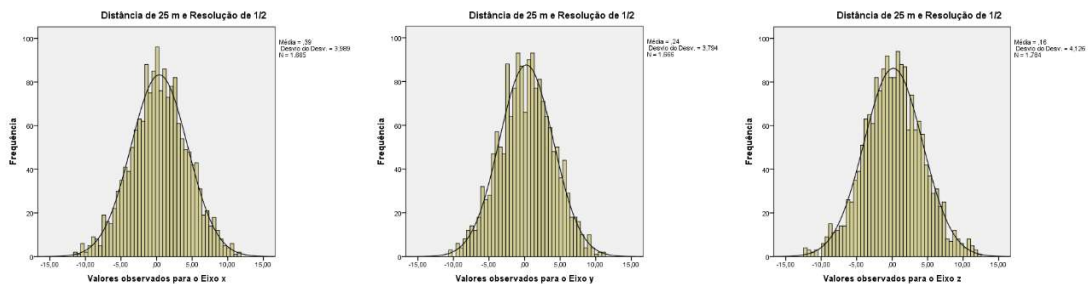


Figura 16 – Histogramas de frequências obtidos para os três eixos em varreduras realizadas à distância de 25 metros com resolução de 1/2. Fonte: Autores (2024).

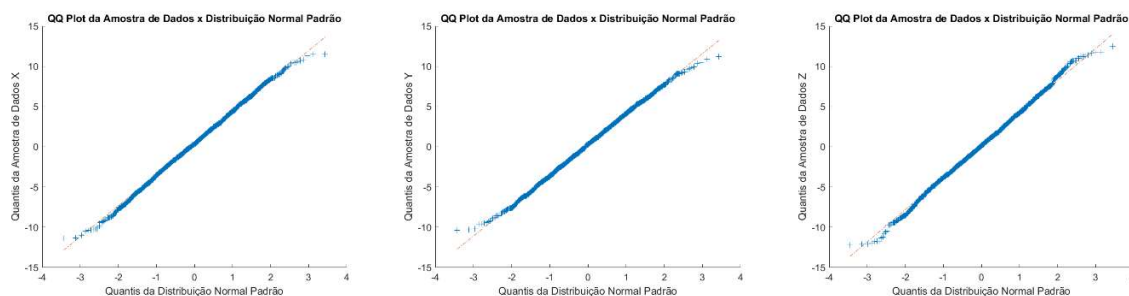


Figura 17 – Gráficos QQ Plot obtidos para os três eixos em varreduras realizadas à distância de 25 metros com resolução de 1/2. Fonte: Autores (2024).

Diante da análise dos gráficos qq-plot, percebe-se que a maioria dos valores observados apresentam o comportamento referente a uma distribuição normal, indicando fortes indícios de que os resíduos são normais. Avaliando-se os gráficos quantil-quantil plot obtidos a partir das diferentes nuvens, a maioria apresenta um comportamento favorável com indícios de referência a uma distribuição normal. Apenas para o eixo Z percebe-se em alguns casos de varreduras obtidas nas distâncias de 15, 20 e 25 metros uma fuga nos extremos. Este comportamento sugere a possibilidade de ocorrência de uma mistura de distribuições, que também pode ser observada a partir da análise dos histogramas de frequências.

Após a análise visual, optou-se por apresentar uma análise da normalidade dos dados com base em testes isolados sobre os valores de assimetria (S_k) e curtose (K) para todas as varreduras. Segundo Ramos (1999), pode-se utilizar como indicativo de que os dados amostrais seguem uma distribuição normal, os valores de assimetria dentro do intervalo $-0,5 \leq S_k \leq 0,5$ e de curtose entre os limites $2,5 \leq K \leq 3,5$.

Após esta análise obteve-se Tabela 14 com os resultados para as diferentes amostras:

Tabela 14 – Avaliação dos valores de assimetria e curtose para as diferentes amostras.

Varreduras	Assimetria ($-0,5 < S_k < 0,5$)			Curtose ($2,5 < K < 3,5$)		
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
Dist. 1m - Resolução 1/2	✓ -0,11	✓ 0,02	✓ -0,20	✓ 2,72	✓ 2,85	✓ 2,99
Dist. 1m - Resolução 1/5	✓ -0,12	✓ 0,08	✓ -0,14	✓ 2,62	✓ 2,90	✓ 3,18
Dist. 1m - Resolução 1/8	✓ -0,10	✓ 0,05	✓ -0,09	✓ 2,65	✓ 2,87	✓ 3,11
Dist. 3m - Resolução 1/2	✓ 0,12	✓ 0,07	✓ -0,14	✓ 2,77	✓ 2,75	✗ 2,47
Dist. 3m - Resolução 1/5	✓ 0,12	✓ 0,06	✓ -0,13	✓ 2,77	✓ 2,75	✓ 2,54
Dist. 3m - Resolução 1/8	✓ 0,15	✓ 0,12	✓ -0,09	✓ 2,84	✓ 2,80	✗ 2,47
Dist. 5m - Resolução 1/2	✓ 0,01	✓ -0,02	✓ 0,08	✓ 2,81	✓ 2,69	✓ 2,61
Dist. 5m - Resolução 1/5	✓ 0,03	✓ -0,04	✓ 0,16	✓ 2,80	✓ 2,65	✓ 2,58
Dist. 5m - Resolução 1/8	✓ -0,09	✓ 0,00	✓ -0,02	✓ 2,85	✓ 2,72	✓ 2,57
Dist. 10m - Resolução 1/2	✓ -0,06	✓ -0,08	✓ 0,39	✓ 2,84	✓ 2,81	✓ 3,37
Dist. 10m - Resolução 1/5	✓ 0,04	✓ -0,04	✓ -0,09	✓ 2,78	✓ 2,88	✗ 2,15
Dist. 10m - Resolução 1/8	✓ 0,11	✓ 0,16	✓ -0,14	✓ 2,96	✓ 2,94	✗ 2,39
Dist. 15m - Resolução 1/1	✓ -0,11	✓ -0,16	✓ -0,17	✓ 2,85	✓ 2,87	✓ 2,75
Dist. 15m - Resolução 1/2	✓ -0,11	✓ -0,10	✓ -0,18	✓ 2,87	✓ 2,90	✓ 2,81
Dist. 15m - Resolução 1/4	✓ -0,28	✓ -0,16	✓ -0,24	✓ 2,90	✓ 2,86	✓ 2,64
Dist. 20m - Resolução 1/1	✓ 0,04	✓ 0,01	✓ 0,06	✓ 2,77	✓ 2,79	✓ 2,70
Dist. 20m - Resolução 1/2	✓ -0,06	✓ 0,00	✓ 0,07	✓ 2,80	✓ 2,84	✓ 2,60
Dist. 20m - Resolução 1/4	✓ 0,30	✓ 0,07	✓ -0,08	✓ 2,98	✓ 2,76	✗ 2,42
Dist. 25m - Resolução 1/1	✓ -0,06	✓ -0,05	✓ 0,02	✓ 2,80	✓ 2,82	✓ 2,81
Dist. 25m - Resolução 1/2	✓ -0,02	✓ -0,05	✓ 0,01	✓ 2,74	✓ 2,88	✓ 3,07
Dist. 25m - Resolução 1/4	✓ 0,02	✓ -0,21	✓ -0,23	✓ 2,65	✓ 3,00	✓ 2,77

Fonte: Autores (2024).

Com a análise de assimetria é possível verificar que para todas as amostras, os dados coletados possuem um comportamento referente a uma distribuição simétrica, considerando-se os limites estabelecidos.

Da análise dos valores de curtose percebe-se um maior achatamento no eixo Z, indicando uma maior dispersão dos valores observados em torno da média, também verificado a partir da análise dos desvios encontrados para este eixo. Assim, pode se afirmar que os dados utilizados apresentam um padrão de normalidade para todas as varreduras nos eixos x e y. Para o eixo z, há um indicativo de presença de erros sistemáticos nas observações para as seguintes varreduras: distância de 3 metros e resoluções de 1/2 e 1/8; distância de 10 metros e resoluções de 1/5 e 1/8 e distância de 20 metros e resoluções de 1/4. Observando o gráfico da Figura 11, fica evidente o maior desvio padrão no eixo z, para as distâncias e resoluções citadas. Para a distância de 3 metros, os valores ficaram bem próximos ao limite inferior para a curtose, apresentando valor calculado de 2,47.

4. Considerações finais

A metodologia proposta se mostrou eficiente e apresentou resultados coerentes com os erros esperados em função das especificações do fabricante. Um fator determinante na acurácia da nuvem de pontos refere-se à incidência do feixe laser sobre os planos durante a varredura, onde ângulos de incidência muito agudos influenciam sobremaneira nos resultados, principalmente na quantidade de pontos da varredura. Esta influência pode ser observada analisando-se os desvios no eixo Z para as distâncias de 1 a 25 metros na resolução de 1/2, utilizada em todas as varreduras.

A proposta de adequação do posicionamento da peça 3D conseguiu obter resultados satisfatórios e confiáveis. Observou-se ainda a degradação do desempenho do LST com a diminuição da resolução para distâncias de até 10 metros, e uma melhor precisão na resolução de 1/4 para as distâncias de 15, 20 e 25 metros.

Os resultados obtidos comprovam a eficiência da metodologia proposta, aplicada em procedimentos de calibração em laboratório utilizando varreduras em equipamentos de curto alcance, com a vantagem de ser um método de fácil implantação com rápidos resultados.

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 no. 402393/2009-0 para fabricação da peça de calibração.

Referências

- BOEHLER, W.; BORDAS, V.; MARBS, A., 2003. *Investigating Laser Scanner Accuracy*. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXIV, part 5/C15, pp696-701. Antalya.
- CHOW, J. C. K., LICHTI, D.D., TESKEY, W. F., 2010. *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, 161-166.
- FARO, 2022. *Documentação de Usuário: FARO Focus Premium e FARO Focus Core*, p 138. FARO© Technologies Incorporation, Outubro de 2022. Disponível em: <https://downloads.faro.com/index.php/s/CokPPexPAr7GeG8?dir=undefined&openfile=160759>
- FARO, 2024. *Documentação de Usuário: Práticas recomendadas para o Laser Scanner*, p. 11 e 12. FARO© Technologies Incorporation, Maio de 2024. Disponível em: https://pt-knowledge.faro.com/Hardware/Focus/Focus/Laser_Scanner_Best_Practices.
- HANCOCK, J. A., 1999. *Laser Intensity-Based Obstacle Detection and Tracking*. PhD thesis, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania.
- HOLST, C.; NEUNER, H.; WIESER, A.; WUNDERLICH, T.; KUHLMANN, H. *Calibration of Terrestrial Laser Scanners*. Fachbeiträge begutachtet, pp. 147-157, 2016.
- IOANNIDIS, J. P. A. What Have We (Not) Learnt from Millions of Scientific Papers with P Values? *The American Statistician*, 73(sup1), 2019, p. 20–25. DOI: <https://doi.org/10.1080/00031305.2018.1447512>
- JORGENSEN, P. C., KUBIK, K., FREDERIKSEN, P.; WENG, W. Ah, robust estimation. *Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry and Surveying*, No. 42, 1985, p. 19 – 32.
- KERSTEN, Th., STERNBERG, H. and MECHELKE, K., 2005. *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.), pp. 122 – 131.
- KAASALAINEN, S., KROOKS, A., KUKKO, A., KAARTINEN, H., 2009. *Radiometric calibration of terrestrial laser scanners with external reference targets*. *Remote Sens.* 2009, 1, 144–158.
- KUBIK, K., WENG, P.; FREDERIKSEN, P. Oh, grossererrors! *Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry and Surveying*, No. 42, 1985, pp. 1 – 18.
- LICHTI, D.D., 2007. Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 61, 307-324.
- LICHTI, D.D., 2008. A method to test differences between additional parameter sets with a case study in terrestrial laser scanner self-calibration stability analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 63, 169-180.
- LICHTI, D.D., 2010. *Terrestrial laser scanner self-calibration: correlation sources and their mitigation*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65, 93-102.

- MEDIĆ, T.; KUHLMANN, H.; HOLST, C. (2021). Empirical Evaluation of Terrestrial Laser Scanner Calibration Strategies: Manufacturer-Based, Target-Based and Keypoint-Based. In: Kopáček, A., Kyrinovič, P., Erdélyi, J., Paar, R., Marendić, A. (eds) Contributions to International Conferences on Engineering Surveying. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51953-7_4
- MIOT, H. A. Avaliação da normalidade dos dados em estudos clínicos e experimentais. *Jornal Vascular Brasileiro*, 16(2), 2017, p. 88-91. DOI: <https://doi.org/10.1590/1677-5449.041117>
- QIANG, Z., WEI, W., 2009. *Calibration of laser scanning system based on a 2D ball plate*. *Measurement*, v. 42, 963-968. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.02.004>.
- QIAO, J.; BUTT, J. A. *Self-calibration of terrestrial laser scanner using a M3C2-based planar patch algorithm*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 197, 2023, p. 335-345, ISSN 0924-2716. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.02.008>.
- RAMOS, A.W, 1999. *Uma contribuição aos estudos de capacidade de máquina*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo. 298p.
- RESHETYUK, Y., 2006. *Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners*. Licentiate thesis in Geodesy. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.
- RESHETYUK, Y., 2010. *A unified approach to self-calibration of terrestrial laser scanning*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65, 445-456.
- SHAN, J., TOTH, C.K. (Eds.), 2017. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, Second Edition (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315154381>.
- SOUDARISSANANE, S., LINDENBERGH, R., MENENTI, M., TEUNISSEN, P., 2011. *Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66, 389-399.
- SHI, S.; MURALIKRISHNAN, B.; SAWYER, D. Terrestrial laser scanner calibration and performance evaluation using the network method, *Optics and Lasers in Engineering*, Volume 134, 2020, 106298, ISSN 0143-8166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106298>.
- TELLING, J.; LYDA, A.; HARTZELL, P.; GLENNIE, C., 2017. *Review of Earth science research using terrestrial laser scanning*. *Earth-Science Reviews* 169, 35-68. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.007>
- ZHOU, T.; CHENG, X.; LIN, P.; WU, Z.; LIU, E. A General Point-Based Method for Self-Calibration of Terrestrial Laser Scanners Considering Stochastic Information. *Remote Sens.* 2020, 12, 2923. <https://doi.org/10.3390/rs12182923>