

CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DE INCERTEZA DE LASER SCANNER TERRESTRE

Márcio Piecha dos Santos, marcio_piecha@hotmail.com^{1 2}

Alex Krummenauer, alex.krummenauer@senairs.org.br²

Arnaldo Ruben Gonzalez, ruben@mecanica.ufrgs.br¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Osvaldo Aranha 99, Porto Alegre, RS.

²Instituto SENAI de Inovação em Sistema de Sensoriamento, Av. Getúlio Vargas 3239 - Vicentina, São Leopoldo, RS.

Resumo. A tecnologia laser scanners é amplamente utilizada em áreas como engenharia, arquitetura e geociências, permitindo a criação de nuvens de pontos e modelos digitais precisos, mas a confiabilidade das medições depende da compreensão das fontes de erro associadas ao método de medição. A calibração de laser scanners terrestres (TLS) é essencial para quantificar esses erros e avaliar a incerteza de medição. Os métodos de calibração de TLS ainda carecem de padronização na literatura, principalmente devido às restrições de propriedade intelectual. Para lidar com essa limitação, muitos estudos se concentram na avaliação do desempenho geral do equipamento. Este estudo propõe uma abordagem de calibração inovadora para compreender as características metrológicas e os fatores que influenciam os TLS. A metodologia permite avaliar, de forma independente, o erro do sistema de medição de distância. O procedimento compara um laser scanner (dispositivo sob teste), e um laser tracker (referência). Um artefato plano foi empregado como padrão de comparação das distâncias. Os resultados indicam que, para medições de até 40 metros, o maior erro de medição e incerteza associada foram de $(0,008 \pm 0,012)$ % da distância medida.

Palavras chave: Calibração, Laser scanner, Laser tracker, incerteza de medição, exatidão.

Abstract. Laser scanner technology is widely used in fields such as engineering, architecture, and geosciences, enabling the creation of accurate point clouds and digital models. However, the reliability of measurements depends on understanding the sources of error associated with the measurement method. The calibration of terrestrial laser scanners (TLS) is essential to quantify these errors and assess measurement uncertainty. Calibration methods for TLS still lack standardization in the literature, mainly due to intellectual property restrictions. To address this limitation, many studies focus on evaluating the overall performance of the equipment. This study proposes an innovative calibration approach to better understand the metrological characteristics and influencing factors of TLS. The methodology enables the independent assessment of the distance measurement system error. The procedure compares a laser scanner (device under test) and a laser tracker (reference instrument). A flat artifact was employed as a reference standard for distance comparison. The results indicate that, for measurements up to 40 meters, the largest measurement error and associated uncertainty were $(0.008 \pm 0.012)\%$ of the measured distance.

Keywords: Calibration, Laser scanner, Laser tracker, Measurement Uncertainty, Accuracy

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de varredura a laser tem se destacado como uma ferramenta revolucionária em diversos campos científicos e industriais, incluindo engenharia, arquitetura, arqueologia, geociências e tecnologia da informação. Desde o início dos anos 2000, a varredura tridimensional (3D) tornou-se um componente essencial de inúmeros processos, possibilitando a aquisição rápida e precisa de grandes volumes de dados. O laser scanner terrestre (TLS) utiliza feixes de laser de alta precisão para gerar nuvens de pontos 3D, que representam virtualmente objetos e ambientes. Essas nuvens de pontos são amplamente aplicadas no mapeamento de edificações históricas, modelagem estrutural tridimensional, inspeção industrial e desenvolvimento de gêmeos digitais (Lemmens, 2011; Sladek, 2016).

Uma das características mais notáveis do TLS é sua capacidade de capturar milhões de pontos por segundo, permitindo análises detalhadas em escalas que vão desde pequenos objetos até grandes infraestruturas. No entanto, a precisão dos resultados obtidos é influenciada por diversos fatores ambientais, estruturais e operacionais, que podem introduzir erros significativos. Por esse motivo, a calibração do TLS é essencial para garantir a confiabilidade das medições. De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia, calibração é o processo de relacionar as medições fornecidas pelo sensor a padrões de referência, permitindo a identificação e correção de erros, bem como a quantificação da incerteza (BIPM, 2008; Ebrahim, 2015; Idrees e Pradhan, 2016; FTCoE, 2022).

Apesar da crescente relevância do TLS, os estudos que abordam suas características metrológicas, como exatidão e incerteza, ainda são limitados. Normas recentes, como a ASTM E3125 e a ISO 17123-9, fornecem diretrizes para a calibração de TLS; contudo, persistem desafios significativos na avaliação do desempenho de cada componente do *laser scanner*. Para contornar essa limitação, muitos estudos concentram-se apenas na avaliação do desempenho geral do equipamento, em vez de focar em seus componentes (ASTM, 2017; ISO, 2018).

Este estudo tem como objetivo propor um método de calibração do sistema de medição de distância do TLS, avaliando-o de forma independente por meio da comparação com um *laser tracker* de referência. Para esse fim, utiliza-se uma placa plana como artefato de referência, permitindo determinar o erro de medição do *laser scanner* e estimar a incerteza associada ao seu processo de medição.

2. TECNOLOGIA DE LASER SCANNER

O *laser scanner* é amplamente reconhecido como uma das tecnologias de aquisição de dados mais eficazes em comparação com outros métodos existentes, pois fornece uma representação multidimensional e de alta precisão do objeto ou ambiente escaneado. O princípio fundamental dessa tecnologia está na capacidade de medir a distância entre o sensor e o(s) alvo(s) de interesse por meio da emissão de um feixe de laser e da determinação do intervalo de tempo até o recebimento do sinal refletido (Lemmens, 2011; Gonzalez-Jorge *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2022).

Esse feixe de laser é direcionado por dois espelhos rotativos equipados com codificadores angulares, que determinam as posições dos pontos adquiridos nos planos de varredura vertical e horizontal, conforme ilustrado na Figura 1 (a). Além da medição de distância, o *laser scanner* também é capaz de capturar a intensidade do sinal refletido e registrar dados espectrais RGB (vermelho-verde-azul) dos objetos ou ambientes, enriquecendo assim as informações obtidas (Lemmens, 2011; Gonzalez-Jorge *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2022; FARO, 2021).

Cada ponto P capturado pelo sensor é inicialmente registrado com a distância medida pelo laser e as posições angulares vertical e horizontal fornecidas pelos codificadores, formando um sistema de coordenadas esféricas (l, α, β), conforme mostrado na Figura 1 (b). Esse sistema de coordenadas esféricas é posteriormente convertido em um sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z) por meio da Equação 1. O resultado desse processo é uma nuvem de pontos tridimensional altamente detalhada e precisa (Lemmens, 2011; Gonzalez-Jorge *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2022; FARO, 2021; NIST, 2002; Leica, 2020; Vosselman e Maas, 2010).

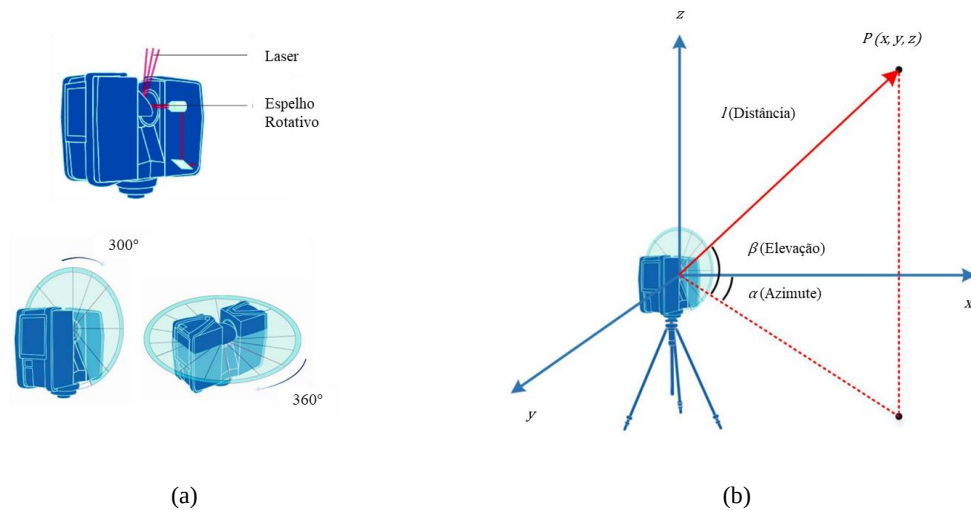


Figura 1. *Laser scanner* terrestre: (a) Sistemas de medição; (b) Sistema de coordenadas esféricas (FARO, 2021).

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha \\ l \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha \\ l \cdot \cos \beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Os principais métodos de medição de distância em scanners a laser terrestres (TLS) baseiam-se no tempo de voo (*Time of Flight – ToF*), que pode ser classificado como direto (pulso) ou indireto (modulação de onda contínua), sendo este baseado na modulação de frequência ou de amplitude de uma onda contínua, também conhecido como *phase shift* (deslocamento de fase) (Vosselman e Maas, 2010; Schulz, 2007; Shan e Toth, 2018).

A medição direta por tempo de voo consiste na emissão de um pulso de luz de alta energia, tipicamente um feixe de laser, em direção a um alvo. Quando o pulso atinge o alvo, parte da luz é refletida e detectada por um receptor sensível ao tempo, conforme ilustrado na Figura 2 (a). Como a velocidade da luz é uma constante conhecida, a distância pode ser

calculada com base no tempo medido, dividido por dois, uma vez que a luz percorre um trajeto de ida e volta entre o sensor e o objeto (Ebrahim, 2015; Schulz, 2007; Shan e Toth, 2018; Rueger, 1996).

A medição de distância por meio do método de onda contínua com modulação em frequência (*Frequency Modulated Continuous Wave – FMCW*) utiliza uma onda cuja frequência oscila de forma contínua e previsível ao longo do tempo. O sinal emitido, ao atingir o alvo, mistura-se com o sinal refletido. Esse sinal combinado passa por um filtro passa-baixa, e a distância é calculada com base na frequência de batimento resultante. A estimativa da medição é proporcional à frequência de batimento, ou seja, à diferença entre as frequências do sinal emitido e do sinal refletido, conforme ilustrado na Figura 2 (b) (Shan e Toth, 2018; Rueger, 1996; Borges, 2017).

No método de onda contínua com modulação em amplitude (*Amplitude Modulated Continuous Wave – AMCW*), uma onda contínua, conhecida como onda portadora, é modulada em amplitude por um sinal de referência, geralmente uma função periódica, como uma senoide. Esse sinal modulado é transmitido em direção ao alvo, e o sinal refletido é recebido pelo sensor. A distância é determinada por meio da análise da diferença de fase entre os sinais emitido e refletido, a qual é diretamente proporcional à distância percorrida pelo sinal, considerando a velocidade da luz como constante, conforme mostrado na Figura 2 (c) (Schulz, 2007; Shan e Toth, 2018; Pfeifer e Briesse, 2007).

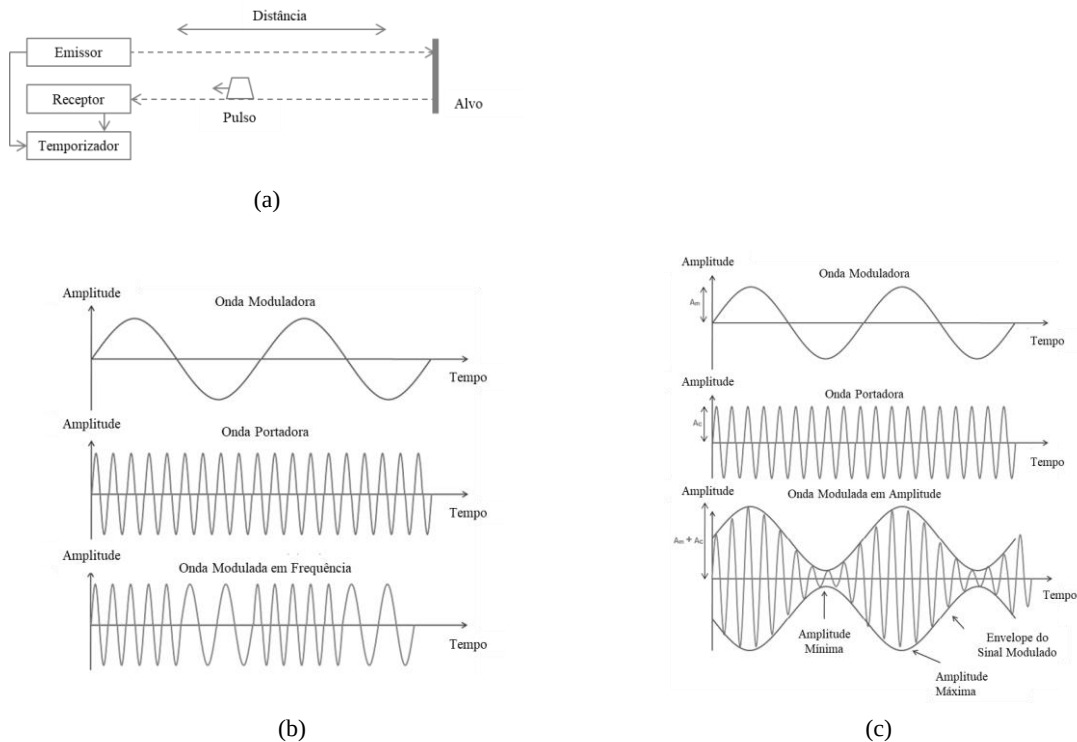


Figura 2. Métodos de medição de distância para *laser scanner*: (a) Pulso; (b) Onda modulada em frequência; (c) Onda modulada em amplitude (Adaptado de Schulz, 2007; Shan e Toth, 2018; Pfeifer e Briesse, 2007).

2.1. Calibração e Componentes de Incerteza

Diversos estudos sobre a avaliação das características metrológicas de scanners a laser comparam diferentes tecnologias com o objetivo de quantificar os erros de medição e analisar o impacto da precisão do equipamento na nuvem de pontos (Borges, 2017; Rachakonda *et al.*, 2014; Muralikrishnan *et al.*, 2017; Shi *et al.*, 2020a; Shi *et al.*, 2020b; Wang *et al.*, 2020; Zaque *et al.*, 2020; Muralikrishnan, 2021; Krummenauer, 2024). No entanto, apenas uma minoria desses estudos estima a incerteza de medição associada ao equipamento (Muralikrishnan *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2020; Krummenauer, 2024).

Uma das etapas mais críticas no desenvolvimento de um método de calibração e na quantificação da incerteza de medição é a identificação das principais fontes de influência no processo de medição. Para garantir a exatidão das medições, é fundamental reconhecer todos os fatores que podem afetar os resultados, incluindo as condições ambientais, as características estruturais do sistema de medição, o método operacional adotado, além da presença de erros sistemáticos e aleatórios (BIPM, 2008; Mendes e Rosario, 2020; EA, 2022).

Diversos fatores podem impactar as medições realizadas com um *laser scanner*, sendo que alguns se mostram mais significativos do que outros, dependendo das características estruturais do equipamento, dos sistemas de processamento de dados e dos métodos de filtragem empregados. A Figura 3 apresenta uma visão geral das fontes de influência, conforme identificado por diversos autores (Gonzalez-Jorge, 2017; NIST, 2002; Lichti *et al.*, 2000; Lichti e Harvey, 2002; Boehler

et al., 2003; Frohlich e Mettenleiter, 2004; Zhang *et al.*, 2008; Deng *et al.*, 2014; Ferrucci *et al.*, 2014; Rachakonda *et al.*, 2014; Tsakiri *et al.*, 2015; Dustin e Liscio, 2016; Muralikrishnan *et al.*, 2017; Tan *et al.*, 2020; Shi *et al.*, 2020a; Shi *et al.*, 2020b; Wang *et al.*, 2020; Zaque *et al.*, 2020; Muralikrishnan, 2021; Ou *et al.*, 2022; Krummenauer, 2024).

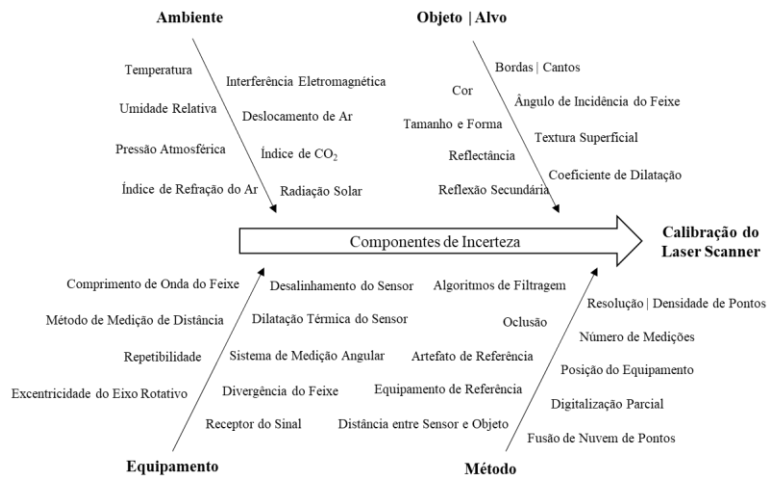


Figura 3. Componentes de incerteza para calibração do *laser scanner*.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O método desenvolvido para calibrar o sistema de medição de distância do *laser scanner* foi baseado no teste de distância relativa recomendado pela norma ASTM E3125, conforme ilustrado na Figura 4 (a) (ASTM, 2017). O teste foi realizado em distâncias de 5 m, 10 m, 20 m e 40 m, por meio do reposicionamento do alvo planar em relação à sua posição inicial (a 1 m do sensor).

Esse teste consiste em medir a posição primária da placa plana (d_0) utilizando tanto o *laser scanner* (equipamento sob teste) quanto o *laser tracker* (instrumento de referência). Em seguida, a placa é deslocada para a posição secundária (d_n) e novamente medida por ambos os dispositivos, conforme mostrado na Figura 4 (b).

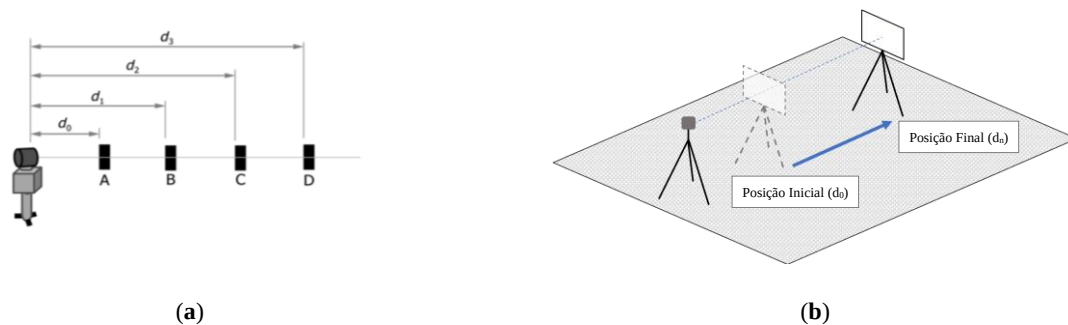


Figura 4. Teste de medição de distância relativa: (a) Recomendação ASTM E 3125; (b) Posicionamento do alvo plano.

Como instrumento de referência, foi utilizado o *laser tracker* Leica AT960-LR, que possui alcance de medição de 80 m e resolução de 0,0001 mm, conforme ilustrado na Figura 5 (a). O equipamento foi empregado para determinar a posição tridimensional da placa plana utilizada como artefato de referência no experimento de calibração. A rastreabilidade do *laser tracker* ao Sistema Internacional de Unidades (SI) é assegurada por meio do certificado de calibração nº 611-21, emitido pela empresa Hexagon em 23 de setembro de 2021.

Para extrair os elementos geométricos do artefato e calcular suas coordenadas tridimensionais, foi utilizado o *software PolyWorks 2018*. O artefato de referência consistia em uma placa plana com 600 mm de comprimento, 400 mm de altura e 20 mm de espessura, fabricada em material laminado branco, conforme ilustrado na Figura 5 (c). A planicidade da placa foi medida com o uso de uma máquina de medição por coordenadas (MMC), a fim de quantificar seu impacto na incerteza de medição, conforme Figura 5 (d).

A escolha de um elemento planar justifica-se por sua capacidade de reduzir a influência do ângulo de incidência do feixe de laser sobre a superfície, otimizando, assim, o sinal de retorno. Essa característica torna o artefato ideal para

medições de distância entre o *laser scanner* e o alvo. No entanto, ao se utilizar um elemento planar, torna-se praticamente impossível determinar exatamente o mesmo ponto para captura simultânea pelo scanner e pelo instrumento de referência. Para contornar essa limitação, três acoplamentos foram fixados à placa para posicionamento do retrorrefletor esférico do *laser tracker*, conforme Figura 5 (b). Esses acoplamentos permitiram determinar a orientação do plano durante os testes e estabelecer um ponto de referência comum na superfície do artefato.

O equipamento sob teste foi o *laser scanner* Faro Focus S-150, ilustrado na Figura 5 (e). Esse dispositivo apresenta um alcance de medição de 0,6 m a 150 m, sendo que a distância até o objeto-alvo é determinada por meio de luz laser modulada em frequência, com comprimento de onda de 1550 nm (espectro infravermelho). O erro máximo admissível para medições lineares de distância é de 1 mm (FARO, 2021).

Para este teste, foi utilizada uma resolução de 28 milhões de pontos, distribuídos por todo o volume esférico de medição do scanner. Essa distribuição resulta em uma distância média de 7,7 mm entre os pontos, considerando um raio de 10 m. A amostragem dos pontos foi realizada quatro vezes, com o objetivo de gerar pontos médios. A varredura foi conduzida utilizando o campo angular completo de medição do equipamento ($360^\circ \times 300^\circ$). Sensores adicionais integrados ao scanner, como inclinômetro, bússola e altímetro, também foram mantidos ativos durante o experimento.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Metrologia Dimensional do Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Sensoriamento, localizado em São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil. Esse ambiente possui controle ambiental, com temperatura de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, umidade relativa de $(55 \pm 10) \%$ e pressão atmosférica de $(1013 \pm 10) \text{ hPa}$.

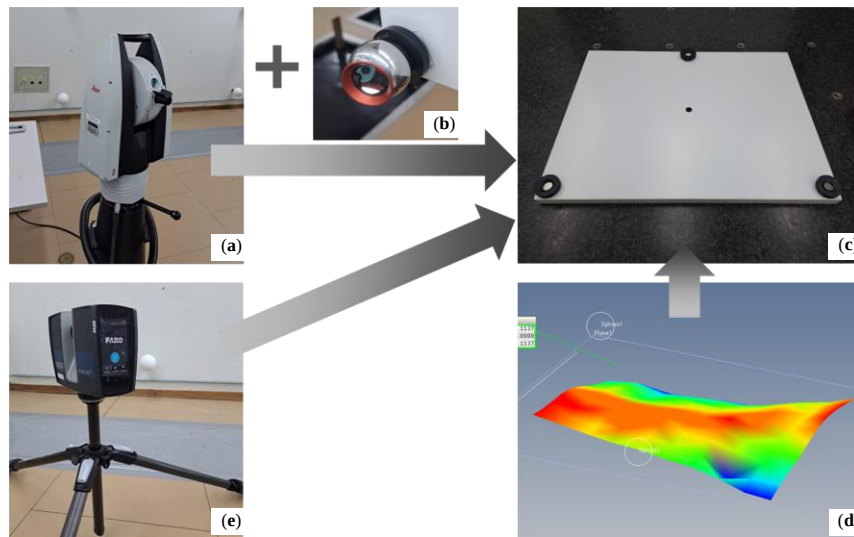


Figura 5. Configuração do método: (a) *Laser tracker* – instrumento de referência; (b) Retrorefletor de anel vermelho 0,5"; (c) Placa plana; (d) Planicidade da placa plana; (e) *Laser scanner* – equipamento sob teste.

A calibração foi conduzida conforme os seguintes passos:

1. Inicialmente, o *laser scanner* e o *laser tracker* foram posicionados lado a lado, conforme ilustrado na Figura 6(a).
2. A placa plana foi posicionada verticalmente sobre um tripé e alinhada em frente ao *laser scanner*. Para verificar a rotação e a inclinação da placa, o *laser tracker* foi utilizado para medir a coordenada y do retrorrefletor em cada um de seus suportes, assegurando que qualquer desvio angular fosse inferior a 2° .
3. Foram adquiridos pontos em cada um dos três suportes, obtendo-se suas coordenadas tridimensionais (x , y , z). Esses pontos foram utilizados para gerar um único ponto médio na superfície da placa, a partir do qual a distância de referência foi calculada.
4. Os parâmetros do *laser scanner* foram configurados de forma que os pontos adquiridos na superfície da placa apresentassem aproximadamente 7 mm de espaçamento entre si.
5. A placa plana foi escaneada com o TLS (*Terrestrial Laser scanner*).
6. Esse processo foi repetido duas vezes.
7. Após a aquisição dos dados com a placa em sua primeira posição (d_0), ela foi deslocada para um segundo ponto de calibração (d_n), e as medições foram repetidas. O procedimento foi realizado novamente, obtendo-se resultados para distâncias de 5 m, 10 m, 20 m (Figura 6 b) e 40 m.

É importante destacar que, à medida que a placa era reposicionada, a resolução da varredura precisava ser ajustada de forma que a distância entre os pontos projetados sobre a superfície da placa permanecesse próxima de 7 mm. Essa exigência está relacionada ao efeito de redução da densidade de pontos à medida que aumenta a distância entre o sensor e o alvo.



Figura 6. Processo de calibração: (a) Placa plana na posição primária; (b) Placa plana na posição secundária 20 m

Após a varredura de todas as posições com o *laser scanner*, as nuvens de pontos foram processadas e avaliadas no *software Faro Scene 2020*, a fim de extrair os elementos geométricos necessários para gerar o ponto centroide da placa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O teste de medição de distância relativa avalia o desempenho do sistema de medição de distância integrado ao *laser scanner* (ASTM, 2017). Esse teste permite a avaliação do desvio na medição de distâncias realizado pelo *laser scanner* e, conseqüentemente, o erro de projeção de cada ponto discreto na nuvem de pontos gerada. Além disso, possibilita a identificação da magnitude dos desvios à medida que a distância medida aumenta.

4.1. Distância de Referência do *Laser Tracker* e Incerteza de Medição Associada

Ao implementar o teste de medição de distância relativa proposto no presente estudo, os seguintes resultados foram obtidos em cada ciclo de medição, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Registro das medições do *laser tracker* e do *laser scanner*.

Distância	1ª Medição (mm)		2ª Medição (mm)		3ª Medição (mm)		Média (mm)		Desvio Padrão (mm)	
	Tracker	Scanner	Tracker	Scanner	Tracker	Scanner	Tracker	Scanner	Tracker	Scanner
5 m	5139,614	5139,7	5139,585	5140,3	5139,594	5140,0	5139,598	5140,0	0,015	0,30
10 m	10189,722	10189,9	10189,724	10189,5	10189,710	10189,3	10189,719	10189,6	0,008	0,31
20 m	20003,493	20003,1	20003,500	20003,0	20003,472	20002,9	20003,488	20003,0	0,015	0,10
40 m	40071,753	40071,8	40071,764	40072,2	40071,763	40072,1	40071,760	40072,0	0,006	0,21

Observa-se que, para as medições realizadas com o *laser tracker*, o maior desvio padrão registrado foi de 0,015 mm, nas distâncias de 5 m e 20 m. Em contraste, para o *laser scanner*, o desvio padrão foi de 0,31 mm no ponto de 10 m, seguido de 0,30 mm no ponto de 5 m.

Com base nesses dados, foi avaliada a incerteza de medição das distâncias de referência determinadas pelo *laser tracker*. Todos os cálculos para estimativa da incerteza foram realizados conforme a metodologia ISO GUM (BIPM, 2008; EA, 2022). A Tabela 2 apresenta o orçamento de incerteza de medição, exemplificando o caso da distância de referência de 5 m. As demais incertezas foram calculadas utilizando a mesma abordagem metodológica.

Tabela 2. Balanço de incerteza para a distância de referência do *laser tracker* – 5 m.

Fonte de Incerteza	Valor (mm)	Probabilidade de Distribuição	Divisor	Coefficiente de Sensibilidade	Incerteza Padronizada (mm)	Graus de Liberdade v_{eff}
Desvio padrão experimental da média	0,0148	<i>t-student</i>	$\sqrt{n}$	1	0,0086	$n-1$
Incerteza herdada da calibração <i>laser tracker</i>	0,0012	Normal	2,00	1	0,0006	∞
Resolução do <i>laser tracker</i>	0,0001	Retangular	$2\sqrt{3}$	1	0,00003	∞
Excentricidade do Retrorrefletor	0,003	Retangular	$2\sqrt{3}$	1	0,00087	∞
				Incerteza Padrão Combinada	Fator de Abrangência k	Graus de Liberdade v_{eff}
				0,008635 mm	4,53	2
				Incerteza Expandida (95,45 %) 0,039 mm		

A incerteza expandida associada ao valor medido de 5139,598 mm foi de 0,039 mm, representando menos de 0,0008% do valor medido. Observa-se também um efeito significativo da repetibilidade das medições, uma vez que os graus de liberdade efetivos (v_{eff}) para a incerteza expandida foram baixos (igual a 2). Esse impacto é visualizado na Figura 7.

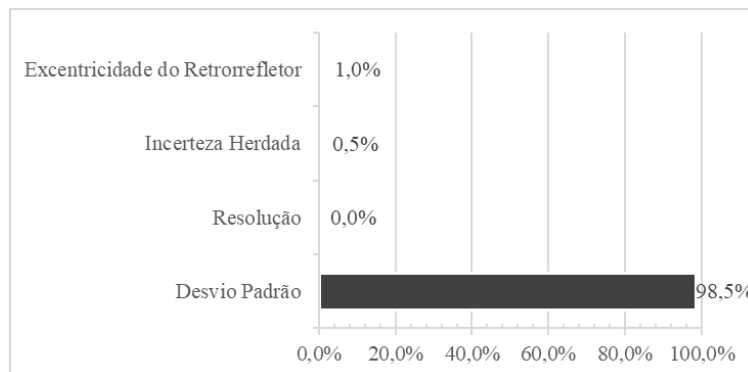


Figura 7. Contribuição da incerteza para a distância de referência do *laser tracker* – 5 m

A repetibilidade é o fator predominante na incerteza padrão combinada, indicando a presença de efeitos aleatórios no processo de medição. Esse efeito pode ser minimizado por meio do aumento do número de medições utilizadas para o cálculo das distâncias médias de referência. Também se pode inferir que o equipamento de referência e o retrorrefletor utilizado apresentam alta precisão, uma vez que seus efeitos sobre a incerteza padrão combinada foram praticamente desprezíveis ($\leq 1,5\%$).

A Tabela 3 apresenta a incerteza de medição para cada uma das posições de referência medidas pelo *laser tracker*.

Tabela 3. Incerteza de medição das distâncias de referência.

Distância	Distância de Referência (mm)	Incerteza de Medição (mm)	Fator de Abrangência k	Graus de Liberdade v_{eff}
5 m	5139,598	0,039	4,53	2
10 m	10189,719	0,020	4,53	2
20 m	20003,488	0,038	4,53	2
40 m	40071,760	0,017	4,53	2

Após o estabelecimento dos valores de referência e suas respectivas incertezas com o uso do *laser tracker* Leica AT960-LR, esses resultados foram comparados com as medições obtidas pelo *laser scanner*.

4.2. Medição do *Laser Scanner* e Incerteza de Medição Associada

A Tabela 4 apresenta os resultados da calibração do *laser scanner*, utilizando o método de medição de distância relativa.

Tabela 4. Resultados da calibração da medição de distância do *laser scanner*

Distância	Distância de Referência (mm)	Média do <i>Laser Scanner</i> (mm)	Erro de Medição (mm)	Incerteza de Medição (mm)	Fator de Abrangência k	Graus de Liberdade v_{eff}
5 m	5139,60	5140,00	0,40	0,60	2,65	5
10 m	10189,72	10189,57	-0,15	0,61	2,65	5
20 m	20003,49	20003,00	-0,49	0,32	2,02	111
40 m	40071,76	40072,03	0,27	0,42	2,23	12

Analisando os resultados obtidos, o maior erro de medição foi observado na distância de 20 m, com resultado de $(0,49 \pm 0,32)$ mm. O menor erro foi registrado na distância de 10 m, com valor de $(0,15 \pm 0,61)$ mm. Observa-se também que as menores distâncias (5 m e 10 m) apresentaram as maiores incertezas de medição ($\geq 0,60$ mm). Isso se refletiu nos maiores fatores de abrangência (k) para essas distâncias, indicando maior dispersão, conforme apresentado na Tabela 4. Estudos similares, como os de Schulz, 2007 e Muralikrishnan *et al.*, 2017, apontaram que, em distâncias mais curtas, os efeitos de colimação e erros de excentricidade do *laser scanner* tornam-se mais significativos.

Ao avaliar o erro em termos percentuais, a distância de 5 m apresentou o maior erro de medição e incerteza, equivalente a $(0,008 \pm 0,012)\%$. De acordo com as especificações técnicas do *laser scanner* testado, o erro máximo admissível para medição de distância direta é de 1 mm, indicando que todos os pontos avaliados atendem aos critérios de desempenho estabelecidos pelo fabricante (FARO, 2021). A Figura 8 ilustra os erros de medição obtidos no ensaio e as incertezas associadas, representadas pela barra de dispersão.

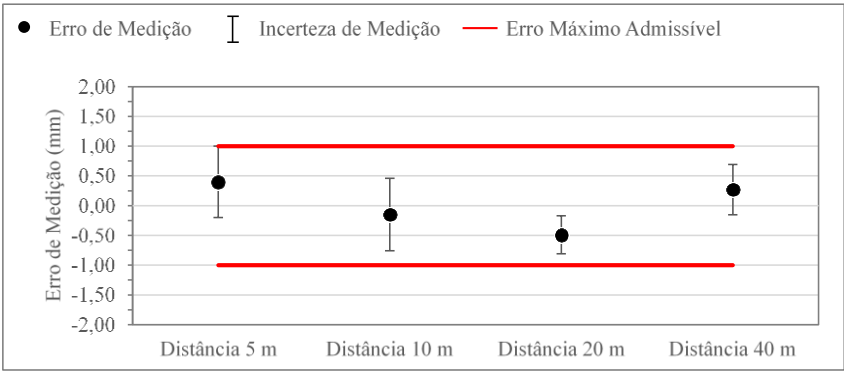


Figura 8. Resultados da calibração da medição de distância com *laser scanner*

Em um estudo semelhante conduzido por Muralikrishnan *et al.*, 2017, os autores obtiveram erros de aproximadamente 0,1 mm e 0,3 mm para distâncias de 20 m e 5 m, respectivamente. Outros autores, como Ferrucci *et al.*, 2014 e Krummenauer *et al.*, 2024, realizaram testes com distâncias de até 10 m, identificando erros inferiores a 1 mm. Já Dustin

e Liscio, 2016 e Schulz, 2007 avaliaram o desempenho do *laser scanner* em distâncias superiores a 30 m, observando que o erro de medição aumenta com o incremento da distância.

Para estimar a incerteza associada à medição do *laser scanner* no teste de distância relativa, foram considerados os seguintes componentes: o desvio padrão experimental da média; a incerteza herdada da posição de referência; a planicidade da placa plana, obtida a partir de sua calibração; e o erro de alinhamento da placa, resultante do erro de projeção do ponto central da placa, considerando um raio de 5 mm e um desvio angular de 2° , conforme ilustrado na Figura 9.

A Tabela 5 apresenta o orçamento de incerteza para a distância de 20 m, e a Figura 10 ilustra a contribuição percentual de cada componente de incerteza. As incertezas para as demais distâncias foram calculadas utilizando a mesma metodologia.

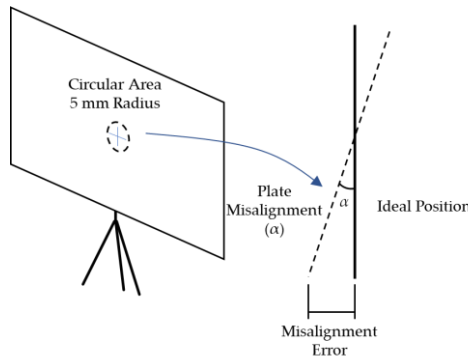


Figura 9. Erro de desalinhamento da placa plana

Tabela 5. Balanço de incerteza para a medição de distância do *laser scanner* – 20 m.

Fonte de Incerteza	Valor (mm)	Probabilidade de Distribuição	Divisor	Coefficiente de Sensibilidade	Incerteza Padronizada (mm)	Graus de Liberdade v_{eff}
Desvio padrão experimental da média	0,10	<i>t-student</i>	$\sqrt{n}$	1	0,0577	$n-1$
Incerteza herdada da distância de referência	0,038	Normal	4,53	1	0,0085	2
Planeza da placa plana	0,114	Retangular	$2\sqrt{3}$	1	0,0329	∞
Desalinhamento da placa na posição inicial	0,175	Retangular	$\sqrt{3}$	1	0,1010	∞
Desalinhamento da placa na posição final	0,175	Retangular	$\sqrt{3}$	1	0,1010	∞
				Incerteza Padrão Combinada	Fator de Abrangência k	Graus de Liberdade v_{eff}
				0,1578 mm	2,02	111
				Incerteza Expandida (95,45 %)		
				0,32 mm		

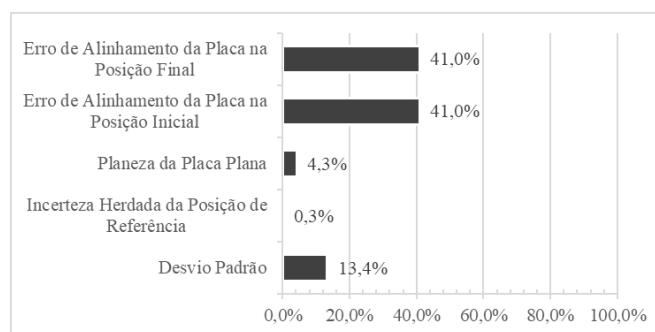


Figura 10. Contribuição da incerteza para a medição de distância com *laser scanner* – 20 m

Observa-se que as maiores influências provêm do posicionamento da placa plana durante os ensaios, conforme ilustrado na Figura 10. Esse fator é considerado duas vezes, uma vez que se trata de uma medição relativa entre a posição primária e a posição secundária da mesma placa, ambas sujeitas ao mesmo efeito de desalinhamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O principal objetivo deste estudo foi propor um método de calibração para o sistema de medição de distância de scanners a laser, com o intuito de estabelecer um procedimento passo a passo para avaliar o desempenho do equipamento e compreender suas características metrológicas. Ao realizar o deslocamento linear da placa plana, buscou-se minimizar o efeito dos *encoders* angulares, permitindo que o erro de medição do sistema de distância fosse avaliado de forma independente. De forma geral, o método de calibração proposto neste estudo demonstrou ser coerente e robusto quando comparado aos resultados obtidos por outros autores.

Observou-se também que apenas uma minoria dos pesquisadores apresenta estimativas de incerteza de medição associadas aos seus resultados, como verificado em Shi *et al.*, 2020b e Krummenauer *et al.*, 2024. Este é um fator crítico na definição de um método de calibração, uma vez que a incerteza de medição, como parâmetro de dispersão, caracteriza os diversos efeitos que influenciam o processo. Embora muitos autores apresentem métodos que resultam em baixos erros de medição, a ausência da incerteza associada compromete a conclusão sobre a eficácia do método, o que pode ser destacado como uma importante contribuição deste estudo.

O método de medição de distância relativa permitiu a análise do comportamento do sistema de medição de distância do *laser scanner* em função do deslocamento linear do objeto-alvo, minimizando os efeitos decorrentes de sistemas rotacionais. Para as medições realizadas até 40 m, o maior erro de medição e incerteza associada foram equivalentes a $(0,008 \pm 0,012)\%$ da distância medida.

Os resultados apresentados e a avaliação dos componentes de incerteza contribuem com os estudos anteriores e fornecem contribuições inéditas para a calibração de scanners a laser, destacando-se: o método passo a passo desenvolvido para a realização da calibração; a apresentação dos orçamentos de incerteza dos ensaios realizados; e a compreensão do impacto de cada componente de incerteza e da significância de seus efeitos.

Entretanto, é importante reconhecer as limitações deste estudo, relacionadas ao espaço físico disponível no laboratório utilizado como ambiente de ensaio, o que restringiu a execução da calibração a maiores distâncias. Ainda que essas limitações não comprometam os resultados obtidos, elas apontam para a necessidade de cautela ao generalizar as conclusões.

6. REFERÊNCIAS

- ASTM, 2017. “ASTM E 3125 - Standard Test Method for Evaluating the Point-to-Point Distance Measurement Performance of Spherical Coordinate 3D Imaging Systems in the Medium Range”.
- BIPM JCGM/WG 2, 2012. “JCGM 200: International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms – VIM (2008 version with minor corrections)”, 3 ed. 15 Mar. 2025 <<https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications>>.
- BIPM JCGM/WG 1, 2008. “JCGM 100: Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement”, 1 ed. 10 Jan. 2025 <<https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications>>.
- Boehler, W. *et al.*, 2003. “Investigating laser scanner accuracy”. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Informations Sciences*, volume 34, pp. 696-701.
- Borges, P., 2017. *Laser scanners Terrestres: Desenvolvimento de metodologias para análise da acurácia*. Tese de Doutorado, Universidade Politécnica de São Paulo, Brasil.
- Deng, X. *et al.*, 2014. “Calibration for laser scanner based on the NIM 80 m indoor ranging facility”. *Key Engineering Materials*, volume 625, pp. 14-19.
- Dustin, D. e Liscio, E., 2016. “Accuracy and Repeatability of the Laser Scanner and Total Station for Crime and Accident Scene Documentation”. *Journal Association of Crime Scene Reconstruction*.
- EA Laboratory Committee, 2022. “EA 4/02 M: 2022 – Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration”, rev. 3. 10 Jan. 2025 <<https://european-accreditation.org/publications/ea-4-02-m/>>.
- Ebrahim, M., 2015. “3D laser scanners’ techniques overview”. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, volume 4(10), pp. 323-331.
- FARO, 2021. “FARO Laser Scanner Focus S Manual”. 12 Feb. 2025 <https://knowledge.faro.com/Hardware/Focus/Focus/User_Manuals_and_Quick_Start_Guides_for_the_Focus_Laser_Scanner>.
- Ferrucci M., *et al.*, 2014. “Evaluation of a laser scanner for large volume coordinate metrology: a comparison of results before and after factory calibration”. *Measurement Science and Technology*, volume 25.
- Forensic Technology Center of Excellence, 2022. “Guidelines for use of terrestrial LiDAR scanners in criminal justice applications”. 12 Feb. 2025 <https://forensiccioe.org/guidelines_terrestrial_lidar_scanner/>.

- Frohlich, C. e Mettenleiter, M., 2004. "Terrestrial laser scanning – New perspective in 3D surveying". *International Society for Photo-grammetry and Remote Sensing Archives – Volume XXXVI-8/W2*, volume 36, pp. 7-13.
- Gonzalez-Jorge, H. et al., 2017. "Metrological intercomparison of six terrestrial laser scanning systems". *IET Science, Measurement & Technology*, volume 12(2), pp. 218-222.
- Idrees, M. e Pradhan, B., 2016. "A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: A review of sensors, method and application development". *International Journal of Speleology*, volume 45(1), pp. 71-88.
- ISO, 2018. "ISO 17123-9 – Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments- Part 9: Terrestrial laser scanners".
- Krummenauer A., et al., 2024. "Comparison of Dimensional Accuracy between a Laser Scanner and a Laser Tracker with Handheld Scan in a Laboratory Setting". *Metrology*, volume 4(2), pp. 205-226.
- Leica, 2020. "Leica RTC360/RTC360 LT User Manual". v. 3.1.
- Lemmens, 2011. *M. Geo-information: Technology, applications and the environment*, v. 5; Springer: Dordrecht, Holanda.
- Lichti, D., et al, 2000. "Calibration and testing of a terrestrial laser scanner". *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing – Volume XXXIII Part B5*.
- Lichti, D. e Harvey, B., 2002. "The effects of reflecting surface material properties on time-of-flight laser scanner measurements". *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing – Volume XXXIV Part 4*.
- Mendes, A. e Rosario, P., 2020. *Metrologia e Incerteza de Medição: Conceitos e Aplicações*, 1st ed.; LTC: Rio de Janeiro, Brasil.
- Muralikrishnan, B., et al., 2017. "Relative range error evaluation of terrestrial laser scanners using a plate, a sphere, and a novel dual-sphere-plate target". *Measurement*, volume 111, pp. 60-68.
- Muralikrishnan, B., 2021. "Performance evaluation of terrestrial laser scanners—a review". *Measurement Science and Technology*, volume 32.
- NIST, 2002. "NISTIR 6922 – Calibration Experiments of a Laser scanner". 12 Feb. 2025. <<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir6922.pdf>>.
- Ou, J., et al., 2022. "Comparative Analysis on the Effect of Surface Reflectance for Laser 3D Scanner Calibrator". *Micromachines*, volume 13.
- Pfeifer, N.; Briese, C. 2007. "Laser scanning—Principles and applications". In *Proceedings of the GeoSiberia 2007, International Exhibition and Scientific Congress*, Novosibirsk, Rússia.
- Rachakonda, P., et al., 2014. "A Method of Determining Sphere Center to Center Distance Using Laser Trackers For Evaluating Laser Scanners". *Volumetric Performance Evaluation of Laser Scanners Using a Calibrated Grid of Spheres Conference*.
- Rueger, J., 1996. *Electronic Distance Measurement: An Introduction*, 4th ed.; Springer: Berlim, Alemanha.
- Schulz, T., 2007. *Calibration of a Terrestrial Laser scanner for Engineering Geodesy*. Tese de Doutorado, Technical University of Berlin, Alemanha.
- Shan, J. e Toth, C., 2018. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, Estados Unidos da América.
- Shi, S., et al., 2020a. "Improvised Long Test Lengths via Stitching Scale Bar Method: Performance Evaluation of Terrestrial Laser Scanners per ASTM E3125-17". *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, volume 125.
- Shi, S., et al., 2020b. "Terrestrial laser scanner calibration and performance evaluation using the network method". *Optics and Laser in Engineering*, volume 134.
- Sladek, J., 2016. *Coordinate Metrology: Accuracy of Systems and Measurements*; Springer: Berlim, Alemanha.
- Tan, K., et al., 2018. "Investigation of TLS Intensity Data and Distance Measurement Errors from Target Specular Reflections". *Remote Sensing*, volume 10(7).
- Tsakiri, M. et al., 2015. "Evaluation of a pulsed terrestrial laser scanner based on ISO standards". *Surface Topography: Metrology and Properties*, volume 3.
- Vosselman, G. e Maas, H., 2010. *Airborne and terrestrial laser scanning*, 1st ed.; Whittles: Caithness, Escócia.
- Wang, L., et al., 2020. "A first realization of ASTM E3125-17 test procedures for laser scanner performance evaluation". *Measurement*, volume 153.
- Wu, C., et al., 2022. "Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry". *Sensors*, volume 22(1), pp. 265.
- Zaque, W. et al., 2020. "Modelo para evaluación de la exactitud de escáner láser terrestre – TLS". *Revista Logos, Ciencia & Tecnología*, volume 12(1), pp. 45-57.
- Zhang, Y., et al., 2008. "Accuracy Evaluation of Three Dimensional Laser Range Scanner Based on Field Calibration". *Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, pp. 119-126.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.