



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DAS ESCALAS ANGULARES NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DE ESTAÇÃO TOTAL EM AMBIENTE LABORATORIAL

Everton Luis Fernandes do Amaral, evertonlfa@gmail.com¹
Marcio Piecha dos Santos, marcio_piecha@hotmail.com¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Porto Alegre-RS, Brasil.

Resumo. A necessidade de um método robusto de calibração é motivada pela evolução tecnológica dos equipamentos e pela demanda crescente por precisão e rastreabilidade metrológica em sistemas de medição de grandes volumes. O estudo proposto busca responder a estas necessidades por meio da avaliação da precisão das escalas angulares em um método que não somente atenda às exigências normativas, mas também introduza melhorias significativas nos processos de calibração angular de estações totais. Uma análise comparativa é apresentada, objetivando avaliar os resultados obtidos através da calibração das escalas angulares horizontal e vertical em ambiente laboratorial de uma estação total Topcon, modelo Basic. Para a escala horizontal, as incertezas de medição permaneceram dentro do critério de aceitação estabelecido pela norma ABNT NBR 13133. Já para a escala vertical, apenas os pontos de 285° e 300° ficaram acima do estipulado pela norma.

Palavras-chave: topografia, incerteza de medição, calibração, precisão, estação total.

Abstract. The need for a robust calibration method is driven by the technological evolution of equipment and the growing demand for precision and metrological traceability in large volume measurement systems. The proposed study seeks to address these needs by evaluating the accuracy of angular scales in a method that not only meets regulatory requirements but also introduces significant improvements in the angular calibration processes of total stations. A comparative analysis is presented, aiming to evaluate the results obtained through the calibration of the horizontal and vertical angular scales in a laboratory environment of a Topcon total station, Basic model. For the horizontal scale, the measurement uncertainties remained within the acceptance criterion established by the ABNT NBR 13133 standard. However, for the vertical scale, only the points at 285° and 300° were above the stipulated by the standard.

Keywords: topography, measurement uncertainty, calibration, precision, total station.

1. INTRODUÇÃO

A metrologia, especialmente no campo da geodésia e topografia, tem evoluído significativamente devido aos avanços tecnológicos em instrumentos de medição. Esta evolução é impulsionada pela crescente necessidade de precisão nas medições geodésicas, que são essenciais para a infraestrutura civil, planejamento territorial e ambiental, bem como para a execução de grandes projetos de engenharia. Neste cenário, as estações totais, que combinam a medição de ângulos e distâncias com alta precisão, emergem como ferramentas cruciais. A calibração desses instrumentos é fundamental para garantir a validade dos dados coletados (Ježko, 2007; Izvoltová & Chromcák, 2015; Xia et al., 2006; Lima & Silva, 2017).

O avanço tecnológico das estações totais teve um impacto substancial no cálculo de áreas em projetos cartográficos e na topografia industrial, permitindo medições automáticas de distâncias e ângulos. Essas ferramentas oferecem uma coleta de dados mais dinâmica em ambientes de campo, superando métodos manuais na determinação de grandes dimensões. Os sistemas eletrônicos integrados proporcionam rapidez, precisão, unificação de equipamentos, expansão de armazenamento, maior velocidade de comunicação e processamento de dados (Xia et al., 2006; Lima & Silva, 2017).

A necessidade de revisão contínua dos métodos de calibração é ressaltada devido à evolução dos equipamentos topográficos e à integração de novas tecnologias. A verificação das estações envolve a determinação dos desvios das características nominais dos instrumentos em relação aos limites das especificações para ângulos verticais, horizontais e distâncias. Isso assegura que os dados possam ser corretamente armazenados e utilizados para garantir medições precisas, enquanto desvios significativos demandam ajustes necessários (Teixeira et al., 2014; ABNT NBR 13133, 2021; ISO 17123-1, 2014).

O processo de calibração estabelece a relação entre os valores e incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes dos instrumentos. A rastreabilidade metrológica é promovida através da relação de um resultado de medição com uma referência, seguindo uma hierarquia de calibração. Esse processo é crucial para garantir a

qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos durante a avaliação (ABNT NBR ISO/IEC Guia 99, 2014; NIT-Dicla 030, 2021).

Historicamente, o processo de calibração para círculos horizontais e a precisão da medição dos ângulos em teodolitos era baseado na norma ISO 8322-4. Atualmente, a calibração em campo para teodolitos ópticos e eletrônicos e estações totais é definida pelas normas ISO 17123, partes 3, 4 e 5, além de outros métodos analisados para ambientes laboratoriais (Ježko & Bajtala, 2005; Ježko, Mokroš & Tajzler, 2004; Dzierzega & Scherrer, 2003).

Desta forma, este estudo visa desenvolver um método de calibração de estações totais, para escalas angulares horizontal e vertical, em ambiente laboratorial, classificadas a partir da classe 1 conforme a norma ABNT NBR 13133, que garanta rastreabilidade metrológica, atenda aos requisitos técnicos de operação e assegure uma incerteza de medição que seja inferior aos limites estabelecidos para a respectiva classificação.

2. METODOLOGIA

O estudo proposto tem como objetivo avaliar a precisão das escalas angulares no processo de calibração de uma estação total, permitindo a determinação dos erros de medição angulares verticais e horizontais. A proposta visa estabelecer a rastreabilidade metrológica e avaliar a repetibilidade do método, utilizando uma série de equipamentos e padrões para atender a esses requisitos e garantindo uma baixa incerteza de medição.

Os testes foram realizados em um laboratório de metrologia com infraestrutura metrológica robusta que atende às exigências da norma ABNT ISO/IEC 17025 e possui acreditação pela CGCRE/INMETRO para a área dimensional para calibração de instrumentos de medição e padrões. O laboratório mantém um controle rigoroso de condições ambientais, com temperatura mantida em $20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar em $55\% \pm 10\%$, essencial para a precisão dos testes.

Durante o processo de calibração, foram empregadas metodologias específicas para a calibração dos ângulos horizontais e verticais, utilizando uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) da Zeiss, modelo Prismo Ultra, como padrão de referência. Este equipamento apresenta resolução de $0,00002\text{ mm}$ e uma incerteza de medição de $0,5\text{ }\mu\text{m} + L/500\text{ mm}$, permitindo medições de alta exatidão. Para a calibração, utilizaram-se padrões como esferas de cerâmica de 20 mm para avaliação da escala angular horizontal e apalpadores com esferas de rubi de 8 mm para a vertical, escolhidos devido ao seu baixo erro de forma, garantindo assim a confiabilidade metrológica do processo.

A validação do método sugerido foi efetuada com o uso de uma estação total da Topcon, modelo Série GM 50 – Topcon Basic. Esta estação possui especificações técnicas que incluem precisão angular de $2''$, resolução angular de $1''$ e é classificada como classe 1. O critério de aceitação angular estabelecido neste estudo baseia-se no desvio padrão das medições para cada ponto analisado. Este critério estipula que o desvio padrão angular deve ser menor que $2''$, de acordo com os valores indicados na norma ABNT NBR 13133, para uma estação de classe 1.

2.1. Preparação da estação total para calibração dos ângulos horizontais e verticais

A estação total é cuidadosamente posicionada e nivelada sobre a superfície da Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) usando parafusos calantes para garantir estabilidade. Para sua fixação na mesa, grampos são empregados, assegurando que o instrumento permaneça firme durante os procedimentos de medição, conforme ilustrado na fig. 1. A precisão no nivelamento é ajustada com o uso de níveis eletrônicos ou tubulares tóricos, que ajudam a corrigir quaisquer inclinações nos eixos X e Y para que se mantenham abaixo de $10''$.

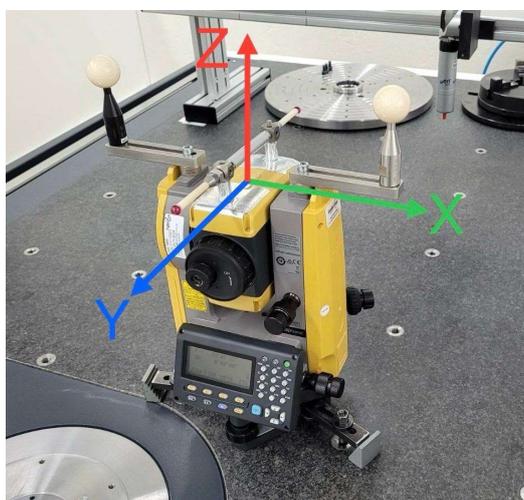


Figura 1. Sistema de orientação (Autor, 2024)

O processo de medição de ângulos é realizado alinhando os eixos que conectam as esferas em cada posição da medição. Essa configuração é essencial para a precisão dos resultados obtidos e é visualizada e monitorada através do software Zeiss Calypso, conforme mostra a fig. 2.

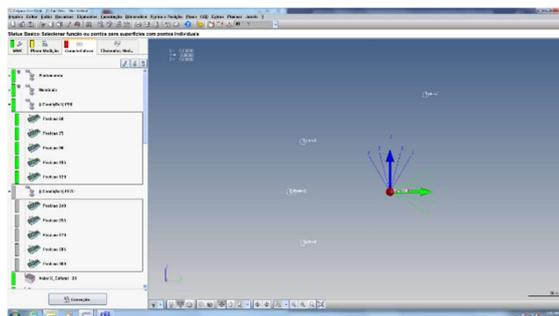


Figura 2. Demonstração do software de medição (Autor, 2024)

Este sistema permite uma avaliação detalhada e precisa dos ângulos medidos, garantindo a confiabilidade das medições realizadas com a estação total.

2.2. Calibração do ângulo horizontal

O processo de calibração da estação total começa com a fixação de duas esferas de cerâmica de 20 mm de diâmetro no corpo do instrumento, distanciadas por aproximadamente 270 mm. Estas esferas, escolhidas por seu baixo erro de forma, servem para definir os pontos de orientação e traçar referências para as medições dos ângulos horizontais. A estação total é inicialmente posicionada na marca de 0° na escala horizontal para estabelecer uma base para as medições subsequentes.

Prosseguindo, a medição das esferas é realizada em pelo menos três posições angulares distintas: 0° , 120° , e 240° . Estas posições ajudam a estabelecer um plano de referência na Máquina de Medição por Coordenadas (MMC), com o sistema angular horizontal tendo origem no centro do círculo formado pelas esferas. Posteriormente, uma linha é criada entre duas esferas medidas e alinhada à rotação no plano da MMC, estabelecendo esta como a linha de referência para os ângulos horizontais.

Finalmente, o giro horizontal da estação total é ajustado para uma série de pontos específicos (30° , 60° , 90° , até 330°), e para cada um desses pontos, as esferas são novamente medidas para formar uma linha. O ângulo horizontal " α " é calculado pela diferença entre as linhas formadas nas diversas posições e a linha de referência na posição 0° . Este procedimento é repetido em cinco ciclos para cada ponto medido, permitindo uma análise estatística robusta dos dados. Ao fim do processo, os valores medidos pela estação total são comparados com os valores de referência da MMC, para determinação do erro de medição.

2.3. Calibração do ângulo vertical

A calibração dos ângulos verticais da estação total é cuidadosamente conduzida utilizando duas esferas de rubi fixadas a aproximadamente 240 mm uma da outra no corpo da luneta, através de um dispositivo especial. Essas esferas, selecionadas por seu baixo erro de forma, servem como pontos de referência na Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) para estabelecer as bases para a medição dos ângulos verticais, de maneira similar à calibração dos ângulos horizontais. Após serem posicionadas, a estação total é alinhada na marca de 0° na escala horizontal, definindo o ponto de partida para as medições verticais que seguirão.

As medições são realizadas em várias posições angulares definidas: inicialmente em 60° , 90° e 120° . Estes pontos ajudam a estabelecer um plano de referência na MMC, indicando a origem do sistema angular vertical no centro do círculo formado pelas esferas. Cada posição é cuidadosamente medida, e as esferas são alinhadas para formar uma linha reta, utilizada como referência para a medição dos ângulos verticais, com a posição de 90° sendo particularmente crucial como linha base.

O procedimento é complementado por uma série de medições adicionais em pontos que incluem 240° , 270° , e 300° , após a inversão da luneta para o lado oposto para abordar as medições na posição de 270° . Cada um desses pontos é medido em cinco ciclos para garantir precisão e consistência. As medições são calculadas usando fórmulas específicas para determinar o ângulo vertical em relação às linhas criadas pelas esferas, assegurando que todos os dados coletados sejam confiáveis e precisos, validando a metodologia de calibração empregada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o processo de calibração, a temperatura ambiente manteve-se estável em 20,1°C, com uma variação na umidade relativa do ar de 62% para 51%. Esse controle das condições ambientais assegura a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos. As esferas de cerâmica foram medidas em posições angulares previamente definidas, e a MMC determinou o centro espacial de cada esfera em coordenadas cartesianas "x, y e z". Com essas informações, uma linha foi traçada entre os pontos para servir de referência nas medições angulares.

Os resultados dessa calibração para a escala horizontal estão representados na tab. 1, indicando os erros de medição do instrumento e as incertezas de medição associadas.

Tabela 1. Resultado da calibração da escala angular horizontal (Autor, 2024)

| Indicação do Instrumento | Valor do Padrão de Referência | Erro de Medição | Incerteza Padrão Combinada | Fator de Abrangência k | Incerteza Expandida | Graus de Liberdade ν_{eff} |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------------|
| 00° 00' 00" | 00° 00' 00" | 0° 00' 00" | - | - | - | - |
| 30° 00' 00" | 30° 00' 0,5" | -0° 0' 0,5" | -0° 0' 0,7" | 2,52 | 0° 0' 1,7" | 6 |
| 60° 00' 00" | 59° 59' 59,7" | 0° 0' 0,3" | 0° 0' 0,6" | 2,16 | 0° 0' 1,2" | 17 |
| 90° 00' 00" | 89° 59' 59,5" | 0° 0' 0,5" | 0° 0' 0,5" | 2,11 | 0° 0' 1,1" | 25 |
| 120° 00' 00" | 120° 00' 0,4" | -0° 0' 0,4" | -0° 0' 0,5" | 2,12 | 0° 0' 1,1" | 22 |
| 150° 00' 00" | 149° 59' 59,9" | 0° 0' 0,1" | 0° 0' 0,5" | 2,15 | 0° 0' 1,1" | 18 |
| 180° 00' 00" | 179° 59' 59,3" | 0° 0' 0,7" | 0° 0' 0,5" | 2,11 | 0° 0' 1,1" | 23 |
| 210° 00' 00" | 209° 59' 59,3" | 0° 0' 0,7" | 0° 0' 0,6" | 2,11 | 0° 0' 1,2" | 24 |
| 240° 00' 00" | 239° 59' 59,9" | 0° 0' 0,1" | 0° 0' 0,5" | 2,13 | 0° 0' 1,1" | 20 |
| 270° 00' 00" | 269° 59' 58,8" | 0° 0' 1,2" | 0° 0' 0,8" | 2,37 | 0° 0' 1,9" | 8 |
| 300° 00' 00" | 299° 59' 59,6" | 0° 0' 0,4" | 0° 0' 0,6" | 2,32 | 0° 0' 1,4" | 9 |
| 330° 00' 00" | 329° 59' 58,9" | 0° 0' 1,1" | 0° 0' 0,7" | 2,25 | 0° 0' 1,6" | 11 |

A figura 3, ilustra a dispersão dos resultados apresentadas na tabela acima.

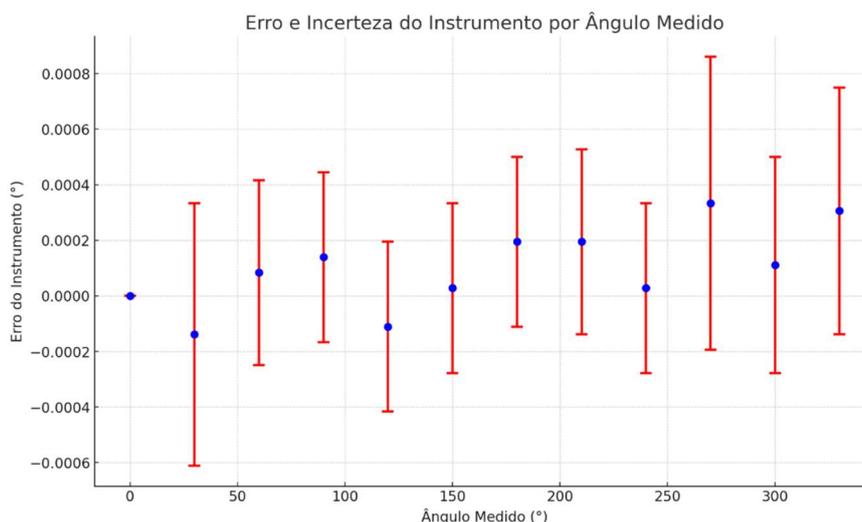


Figura 3. Gráfico da distribuição dos erros e incertezas de medição para os pontos analisados da escala angular horizontal (Autor, 2024)

A análise dos resultados reflete uma alta precisão nas medições realizadas, com erros notavelmente baixos para a maioria dos ângulos. O maior erro observado foi de 1,2", no ângulo de 270°, indicando alta exatidão nas medições. A incerteza de medição variou entre os pontos, como esperado, apresentando para todos os pontos um valor de k superior a 2,00. Isso ilustra que as medições foram significativamente afetadas por fontes de incerteza do tipo A em comparação às de tipo B.

Os resultados da calibração da escala vertical da estação total mostraram uma dispersão de dados maior em comparação com a escala horizontal. Essa maior dispersão foi observada em uma faixa de ângulos de 60° a 300°. Em grande parte dos ângulos avaliados, os erros de medição do instrumento se mantiveram em níveis baixos, mas destacaram-se erros significativos de 5,2" no ângulo de 120° e de 7,9" no ângulo de 300°. Esses erros mais elevados sugerem vulnerabilidades do instrumento a erros sistemáticos ou a variações nas condições de medição. A distribuição desses erros e das incertezas associadas é detalhada na tab. 2.

Tabela 2. Distribuição das incertezas de medição para os pontos analisados da escala angular vertical (Autor, 2024)

| Indicação do Instrumento | Valor do Padrão de Referência | Erro de Medição | Incerteza Padrão Combinada | Fator de Abrangência k | Incerteza Expandida | Graus de Liberdade v_{eff} |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------|----------------------------|--------------------------|---------------------|------------------------------|
| 60° 00' 00" | 60° 00' 0,2" | -0° 0' 0,2" | 0° 0' 0,9" | 2,20 | 0° 0' 1,9" | 14 |
| 75° 00' 00" | 75° 00' 2" | -0° 0' 2" | 0° 0' 0,6" | 2,09 | 0° 0' 1,2" | 29 |
| 105° 00' 00" | 104° 59' 58,8" | 0° 0' 1,2" | 0° 0' 0,5" | 2,43 | 0° 0' 1,2" | 7 |
| 120° 00' 00" | 119° 59' 54,8" | 0° 0' 5,2" | 0° 0' 0,6" | 2,14 | 0° 0' 1,3" | 19 |
| 240° 00' 00" | 240° 00' 3,3" | -0° 0' 3,3" | 0° 0' 1,0" | 2,08 | 0° 0' 2,0" | 33 |
| 255° 00' 00" | 255° 00' 3,6" | -0° 0' 3,6" | 0° 0' 0,4" | 2,06 | 0° 0' 0,9" | 40 |
| 285° 00' 00" | 284° 59' 56,7" | 0° 0' 3,3" | 0° 0' 1,5" | 2,10 | 0° 0' 3,1" | 26 |
| 300° 00' 00" | 299° 59' 52,1" | 0° 0' 7,9" | 0° 0' 1,9" | 2,16 | 0° 0' 4,1" | 17 |

A figura 4, ilustra a dispersão dos resultados apresentadas na tabela referente a calibração da escala vertical.

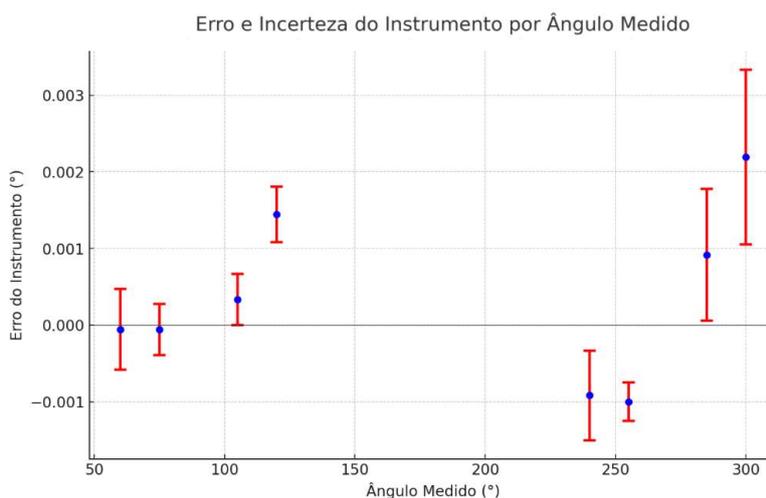


Figura 4. Gráfico da distribuição dos erros e incertezas de medição para os pontos analisados da escala angular vertical (Autor, 2024)

A incerteza expandida de medição mais elevada foi observada no ângulo de 300°, atingindo 4,1", indicando uma dispersão significativa nas medições nesse ponto específico. Adicionalmente, a incerteza de medição apresentou variações notáveis entre os diferentes pontos, com todos os valores de k ultrapassando 2,00. Isso sugere que as medições em ângulos distintos foram afetadas por fontes de incerteza do tipo A, advindos de fatores como alinhamento, fixação da luneta,

procedimento de medição empregado e características específicas do instrumento nesses ângulos. Os padrões de variação observados nas incertezas e nos erros de medição, tanto na escala vertical quanto na horizontal, são influenciados principalmente pelo desvio padrão de cinco ciclos de medição para cada ponto analisado. Estes, desempenham um papel importante no aumento das incertezas.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a eficácia e confiabilidade do método de calibração desenvolvido, especialmente no que tange à precisão das medições angulares e rastreabilidade de medição. A execução de cinco ciclos de medição para cada ponto analisado e o sequenciamento do procedimento de calibração, não só reforçou a precisão dos resultados, mas também permitiu uma avaliação abrangente das incertezas associadas a essas medições. Isso permitiu avaliar sua variabilidade por meio dos resultados apresentados pelas incertezas de medição. Esta análise torna-se fundamental para validar a confiabilidade do método proposto. As técnicas de calibração utilizadas proporcionaram uma adequada quantificação dos erros, destacando-se a estabilidade e consistência dos valores obtidos, que são essenciais para a aplicação prática dessas medições em projetos de topografia e geodésia.

Ao avaliar os critérios de aceitação estabelecidos pela norma ABNT NBR 13133 para uma estação total de classe 1, o desvio padrão angular deve ser igual ou inferior a 2". Levando em consideração este parâmetro, deve-se observar os valores apresentados na incerteza padrão combinada ($k=1$), para fins de comparabilidade. Com a maior incerteza padrão combinada para os pontos calibrados na escala horizontal foi de 0,8" e para a escala vertical foi de 1,9". Sendo assim, ambas escalas, horizontal e vertical, estão em conformidade com o critério de precisão estabelecido pela norma ABNT NBR 13133 para estação total de classe 1. Em relação ao erro de medição, intrínseco às características construtivas do equipamento e resultado dos efeitos que predominam sobre o processo de medição, o maior erro apresentado na escala angular horizontal foi de 1,2", e na escala vertical foi de 7,9". Com isso, considerando a regra de outro da metrologia em que o efeito do equipamento pode ser de até 1/10 da tolerância de processo, esta estação total poderia ser utilizada para medições cuja tolerância fosse de, no mínimo, 79", sem necessidade de correção. Para aplicações em que a exatidão deve ser maior, sugere-se aos usuários que realizem a correção de suas medições a partir dos erros de medição estabelecidos pelo processo de calibração.

Essa análise comparativa é fundamental para a validação contínua do método e para assegurar que ele permaneça alinhado com os avanços tecnológicos e as práticas emergentes no campo da medição geodésica.

Por fim, os resultados e discussões abordados reafirmam a importância de um controle rigoroso de qualidade, bem como de um ambiente laboratorial adequado para a realização dessas calibrações. A precisão das medições, conforme observadas nos testes, são testemunhos da robustez do método de calibração e destacam a necessidade de investimentos contínuos em equipamentos de alta precisão e em treinamento técnico, para assegurar a obtenção de dados confiáveis e precisos, que são vitais para qualquer aplicação prática dentro da engenharia e da geodésia.

5. REFERÊNCIAS

ABNT ISO/IEC Guia 99. Vocabulário Internacional de metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13133: Execução de levantamento topográfico – procedimento. Rio de Janeiro, 2021.

Dzierżęga, A.; Scherrer, R. "The compact method of testing total stations". Survey Review, v. 37, p. 145-154, 2003.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Expressão da incerteza de medição por laboratórios de calibração. NIT-Dicla-021, Revisão 10, 2020.

ISO 17123-1:2014. Optics and optical instruments - Field procedures for testing geodetic and surveying instruments - Part 1: Theory. Geneva, 2014.

Ižvoltová, Jana; Chromcák, Jakub. "Diagnostics of Systematic Errors in Angle Measurements". Procedia Engineering, 111, p. 339-343, 2015.

Ježko, J.; Bajtala, M. "Calibration of Surveying Instruments". Acta Montanistica Slovaca, 10(2), p. 112-118, 2005.

Ježko, J.; Mokroš, J.; Tajzler, I. "Calibration of Horizontal Circles of Theodolites". Geodetic and Cartographic Scope, 50(2), p. 25-29, 2004.

Ježko, Ján. "Calibration and Verification of Horizontal Circles of Electronic Theodolites". Slovak Journal of Civil Engineering, v. 15, n. 4, p. 32-38, 2007.

Lima, A. P. B.; Silva, L. R. "Calibração de estações totais à luz das normas nacionais e internacionais". XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Expositiva. Novembro de 2017, SBC, Rio de Janeiro - RJ, p. 101-105.

Teixeira, Antônio Paulo Pereira et al. "Evidences of the impact of the technology of total stations in the calculation of áreas". Revista Brasileira de Cartografia, 66.1 (2014): 39-51.

Xia, Z.; Luo, Y.; Zheng, Y.; Pan, H. "Error analysis of a reflector in total station angle measurement". Third International Symposium on Precision Mechanical Measurements, 2006.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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