



MÉTODO PARA CALIBRAÇÃO DA ESCALA ANGULAR VERTICAL DE TEODOLITOS E ESTAÇÕES TOTAIS ATRAVÉS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Willian Lima de Oliveira Filho¹, Alessandro Marques², Luiz Henrique Brum Vieira¹

¹ Inmetro, Duque de Caxias, Brasil, wfilho@inmetro.gov.br

² Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, Brasil, amarques@ufpr.br

Resumo: O presente trabalho apresenta uma metodologia para a calibração da escala angular vertical de instrumentos geodésicos (teodolitos e estações totais) através de medição por coordenadas. São abordados os detalhes da montagem do sistema, a estratégia de medição adotada, bem como, o procedimento de medição e os resultados de uma calibração realizada através deste método..

Palavras chave: teodolitos e estações totais, calibração, medição por coordenadas.

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda da Indústria da Construção Civil, Metal Mecânica, Naval e Aeroespacial em relação à rastreabilidade das medições angulares executadas por instrumentos geodésicos tais como teodolitos e estações totais, demanda esta, que pode ser comprovada pela grande quantidade de serviços que têm sido solicitados e que não estão sendo atendidos pelo Inmetro e nem pelos laboratórios da Rede Brasileira de Calibração.

Instrumentos geodésicos são dispositivos portáteis que realizam medições de ângulos e ou distâncias através de componentes mecânicos e optoeletrônicos. São utilizados em diversas aplicações, tais como: construção de estradas, pontes, medição de aeronaves, alinhamento de mancais dos eixos de navios e medição em geodesia, dentre outras.

O teodolito consiste basicamente de um instrumento que realiza medições de ângulos verticais e horizontais através de uma luneta que permite dois movimentos de rotação, um em torno do eixo vertical e outro em torno de eixo horizontal. A cada um desses eixos encontra-se associado um disco graduado com uma escala.

A estação total possui a mesma configuração de eixos e componentes mecânicos de um teodolito, sendo diferenciada, pela incorporação de um dispositivo eletrônico de medição de distâncias (distanciômetro) e por possuir transdutores angulares em substituição aos discos graduados. As estações mais modernas podem ser operadas via controle remoto ou ainda realizar medições automaticamente mesmo com o alvo em movimento.

Atualmente os procedimentos de verificação de teodolitos e estações totais disponíveis não atendem aos quesitos da Metrologia, pois estes avaliam de certa forma,

apenas a repetitividade do instrumento e não comparam os valores lidos com um padrão de referência de ângulo [1].

Alguns exemplos são os procedimentos descritos pelas normas NBR 13.133: 1994 (Execução de Levantamento Topográfico) e a ISO 17.123: 2001. (Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments– Part 3: Theodolites), que estabelecem procedimentos para realização de testes em campo e não definem exigências para a classificação de teodolitos e estações totais em função da exatidão desses instrumentos.

Para atender a essa demanda, o Laboratório de Metrologia Dimensional (Lamed) do Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro), vem desenvolvendo metodologias para calibração de teodolitos e estações totais, sendo que, este serviço, engloba as duas escalas dos instrumentos (horizontal e vertical)

No caso das escalas horizontais, o Lamed já realiza uma metodologia de calibração, através de um procedimento bem definido, onde são comparadas as indicações dos instrumentos com um sistema de referência composto por mesas rotativas e um telescópio colimador que projeta um alvo no infinito. Este método é baseado no procedimento de calibração de polígonos ópticos onde os erros do padrão (mesa rotativa) são separados dos erros do objeto (teodolito ou estação total) [2].

Já para as escalas verticais, ainda não existe um sistema com referências ópticas rastreado aos padrões nacionais que possibilite a efetiva disseminação da grandeza ângulo plano aos instrumentos geodésicos citados.

Este trabalho objetiva apresentar uma nova metodologia desenvolvida pelo Lamed para calibração da escala vertical de teodolitos e estações totais avaliando se a mesma é adequada para atender a demanda de calibração dos instrumentos geodésicos.

Esta metodologia baseia-se na utilização de uma haste padrão como meio de contato, acoplado à luneta dos instrumentos, permitindo a calibração do ângulo vertical através de técnicas de medições por coordenadas. Ou seja, com emprego de um meio de contato, assumimos que o ângulo indicado pelo instrumento é igual ao ângulo de inclinação espacial do eixo da haste padrão, mais o erro do instrumento e os erros inerentes ao processo de medição. Com isso, podemos comparar os ângulos indicados no

instrumento e os ângulos determinados pelo software da máquina de medir por coordenadas (MMC).

A rastreabilidade das medições com a MMC se dá através da técnica de calibração por substituição (comparação). Para isso, utilizou-se como padrão um sistema composto por uma régua de seno e um bloco padrão, ao qual também se acoplou a haste padrão, reproduzindo desta forma, as mesmas condições para medição do instrumento. Através desta técnica foi possível determinar o erro de indicação angular da MMC e compensá-lo na calibração da escala vertical dos teodolitos e estações totais.

Apesar da metodologia proposta não considerar os erros da MMC, a qualidade dos resultados das medições está diretamente ligada à exatidão da máquina para medições de ângulos. A seguir é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre máquinas de medição por coordenadas.

2. TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Máquinas de medir por coordenadas são representações de sistemas coordenados cartesianos tridimensionais. A função principal de um sistema de medição por coordenadas é medir a geometria real de uma peça, comparar com o elemento geométrico ideal e avaliar a informação resultante, como comprimento, forma, localização e orientação.

Na medição por coordenadas à geometria de uma peça é obtida por apalpação de pontos discretos sobre a superfície. Cada ponto medido é expresso na forma de coordenadas medidas. Porém, não é possível avaliar os parâmetros da peça (diâmetro, distância, ângulo, etc.) diretamente das coordenadas dos pontos medidos. Portanto, um modelo analítico da peça é utilizado para avaliar estes parâmetros. O modelo geralmente consiste em formas geométricas ideais, também chamadas de elementos geométricos substitutos [3]. Estes elementos são determinados aplicando algoritmos de melhor ajuste aos pontos medidos. Os algoritmos de ajuste utilizados devem ser os apropriados para cada tarefa específica de medição, dependendo da função da peça.

Atualmente as MMCs desempenham um papel de grande importância em relação à rastreabilidade das medições de comprimento em todo o mundo. Devido a sua versatilidade e flexibilidade, elas permitem o acoplamento de sistemas lasers a sua estrutura permitindo a realização de calibrações com alta exatidão. Outra técnica para calibração de padrões é a da substituição, esta que será mais detalhada a seguir.

2.1. Método da substituição para a calibração de padrões

Na calibração por substituição é possível determinar de forma direta os erros sistemáticos atuantes na medição, a partir da medição de um artefato padrão calibrado simulando o objeto a ser medido. Mesmo assim, é possível reduzir outras fontes de incerteza atuantes na medição. Quando utilizada, a técnica de substituição reduz a MMC a um simples comparador, embora diversas fontes de incerteza continuem influenciando a medição, como a repetitividade e a resolução do sistema, entre outros [4].

O padrão materializado calibrado permite realizar uma transferência do mensurando para a peça a ser calibrada, criando um vínculo direto entre as duas medidas. Do ponto de vista da rastreabilidade de medição, a técnica de

substituição fornece um procedimento ideal, embora várias limitações lhes sejam impostas. Entre estas é possível citar a necessidade de padrões corporificados (medidas materializadas) com essencialmente a mesma forma, tamanho e material da peça a calibrar, medido aproximadamente na mesma na mesma localização da MMC e com idêntica estratégia de medição [5].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a calibração das escalas verticais de teodolitos e estações totais, foi adaptada a técnica de calibração por substituição. E para que estes instrumento sejam calibrados através de medição por coordenadas, é indispensável a utilização de um meio de contato, com características geométricas bem definidas. Por isso, adotou-se como meio de contato uma haste padrão de comprimento. Este artefato se caracteriza pela boa planeza e paralelismo entre suas faces de referência. Além disso, trata-se de objeto com boa forma e acabamento superficial na região da sua extremidade cilíndrica, característica esta, de grande importância para metodologia de medição adotada.

Em metrologia por coordenadas, um dos fatores de grande importância para a exatidão das medições é uma boa fixação da peça a ser medida. Para a fixação da haste nos instrumentos geodésicos, foram utilizados alguns recursos, como será detalhado a seguir.

3.1. Dispositivo para fixação da haste

Geralmente teodolitos e estações totais possuem fixados na parte superior e inferior de suas lunetas um dispositivo para a realização de uma mira grosseira no alvo que se deseja focar. Este dispositivo é parafusado geralmente na região central da superfície do topo da luneta do instrumento, possibilitando facilmente sua retirada.

Em alguns instrumentos a haste pode ser fixada diretamente na luneta através de uma alça metálica conforme a Fig. 1 ou outra peça semelhante. No entanto, alguns instrumentos, possuem lunetas que suportam outros componentes, ou ainda, a sua própria estrutura mecânica não permite uma fixação mais simples. Nesse caso, faz-se necessário a confecção de um dispositivo específico para a fixação da haste, conforme a Fig. 2.

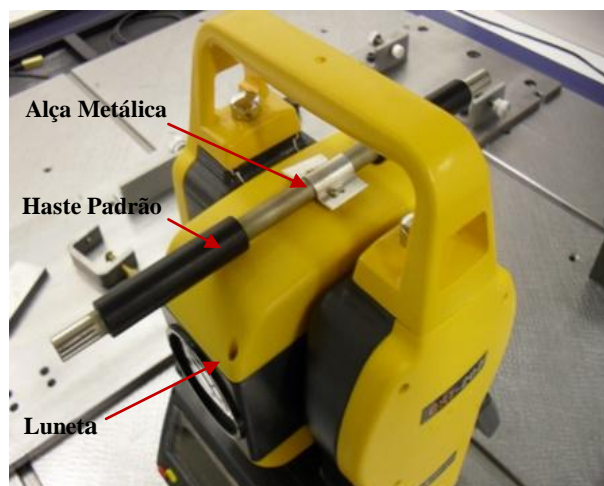


Fig. 1. Exemplo de fixação da haste padrão em uma estação total

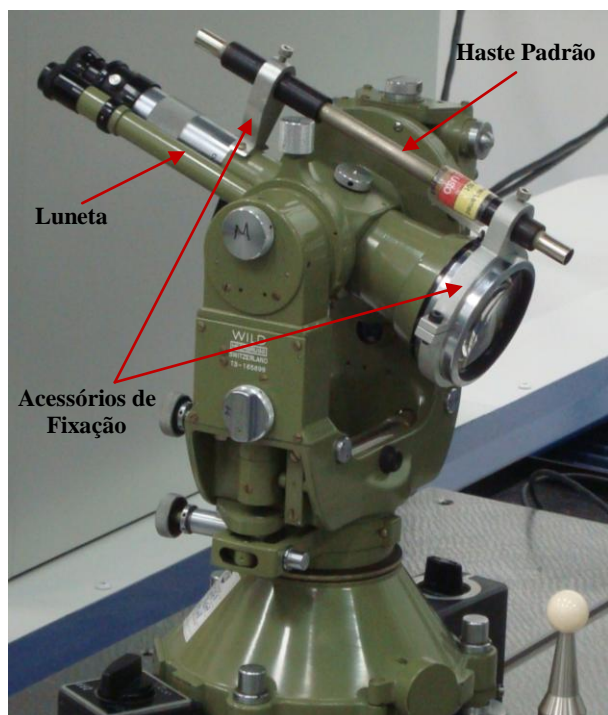


Fig. 2. Dispositivo para fixação da haste em teodolitos Wild T3

3.2. Definição do sistema de coordenadas da peça

A criação do sistema de coordenadas foi baseada inteiramente na geometria cilíndrica da extremidade da haste padrão. Foram adotados dois sistemas de coordenadas. Um para a medição de qualquer ângulo, utilizado quando o instrumento estivesse com a luneta completamente horizontal (indicação 90° na escala vertical). E outro para quando a luneta se encontrava deslocada de um ângulo qualquer.

Para ambas as posições da luneta, o sistema de coordenadas foi definido através da associação de elementos fundamentais, tais como: plano, linha e ponto (sequência PLP). Os elementos foram distribuídos da seguinte forma na geometria da peça:

Plano: Determinado sobre a face de medição da haste padrão através de 4 pontos.

Linha: Determinada sobre a face de medição da haste através de 2 pontos com vetor orientado na direção contrária ao eixo Y da MMC.

Ponto: Determinado a partir do centro de um círculo medido na superfície lateral (plano ZY) de um dos cilindros através de 3 pontos.

Após a realização do PLP o sistema de coordenadas ficou configurado conforme demonstra a Fig. 3.

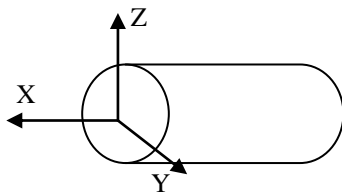


Fig. 3. Localização do sistema de coordenadas na extremidade da haste

3.3. Procedimento de medição

Inicialmente o instrumento (teodolito ou estação total) é fixado na mesa da MMC através de prismas magnéticos. Em seguida é realizado um alinhamento visual do conjunto haste-luneta com o eixo X da MMC, Neste caso não há necessidade de um alinhamento muito exato, devido o sistema de coordenadas estar referenciado na geometria de referência da extremidade da haste.

Foi adotado o eixo X da MMC como referência de alinhamento físico para instrumento, objetivando minimizar os erros intrínsecos ao movimento do eixo Y da máquina (deslocamento da mesa), visto que, desta forma apenas o cabeçote da máquina se desloca durante as medições.

O algoritmo desenvolvido no programa computacional da MMC realiza a medição das duas posições da luneta automaticamente, com interrupções para que o operador altere a posição, fazendo o instrumento indicar o ângulo que se deseja calibrar.

Para obtenção das retas correspondentes a cada posição da luneta, são apalpados em uma extremidade da haste seis pontos, distribuídos em dois círculos de três pontos e determina-se um cilindro. Na outra extremidade, determina-se outro cilindro da mesma forma. Através de uma ferramenta do programa computacional da MMC, conectam-se os dois cilindros fazendo passar uma reta por seus centros.

Este procedimento é realizado para duas posições da luneta. Com o ajuste das duas retas, o programa computacional calcula e indica o ângulo formado entre as mesmas, como demonstra a Fig. 4.

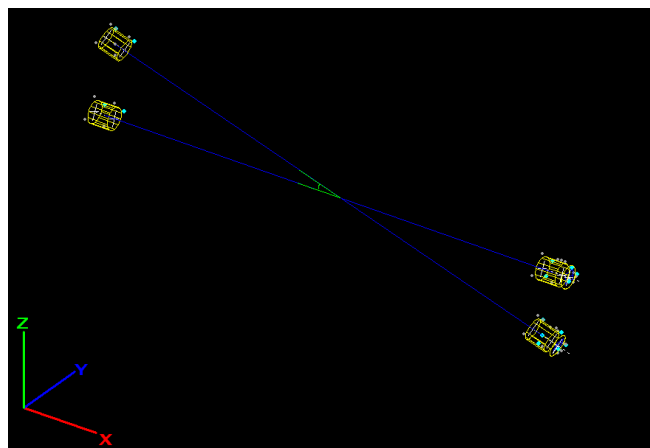


Fig. 4. Visualização dos elementos medidos no software da MMC

3.4. Rastreabilidade das medições angulares com a MMC

Para prover rastreabilidade às medições angulares realizadas pela MMC, foi desenvolvido pelo Lamed, um sistema composto por uma régua de seno e um bloco padrão para gerar um ângulo de referência, através da relação entre seus comprimentos, como ilustra a Fig. 4. Foi utilizada uma régua de seno de comprimento nominal igual a 200 mm e um bloco padrão de 70 mm, com objetivo de gerar um ângulo próximo a 20° . Este valor foi adotado para que haja compatibilidade nos resultados quando se emprega o método da substituição, visto que, os pontos calibrados nos instrumentos correspondem a um deslocamento angular de

20° da escala vertical. No entanto, como citado, os padrões (régua e bloco) quando associados para a geração do ângulo padrão geram um ângulo aproximadamente igual de 20° que pode ser obtido pela equação. 1.

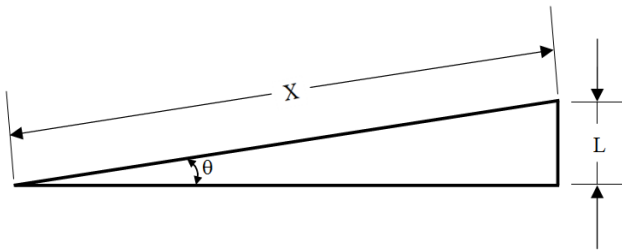


Fig. 4. Princípio de geração ângulo pela relação entre comprimentos

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{L}{X} \right) \quad (1)$$

Onde:

θ : Ângulo padrão

L: Comprimento da régua de seno

X: Comprimento do bloco padrão

Ainda com objetivo de atender as condições definidas pelo método da calibração por substituição, também foi utilizado o recurso de fixar a haste padrão sobre a régua de seno como demonstra a Fig. 5. Desta forma garante-se que a medição do padrão está sendo realizada com a mesma estratégia de medição que o objeto.

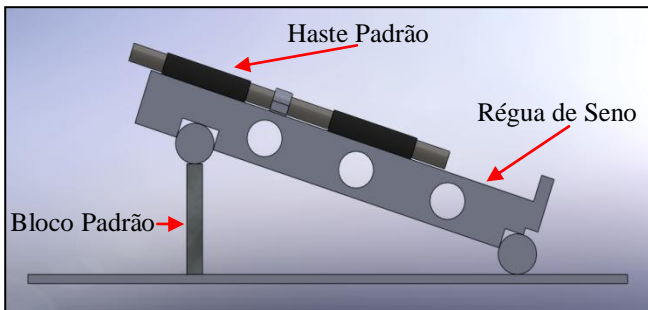


Figura 5. Desenho da montagem realizada para geração do ângulo padrão

3.5. Modelo matemático da medição

O procedimento realizado para determinação do erro e incerteza de medição (calibração) da MMC, através da medição do sistema padrão de ângulo foi exatamente igual ao procedimento descrito no item 3.3. Utilizou-se o mesmo programa de medição para a calibração dos instrumentos geodésicos. O padrão também foi posicionado aproximadamente na mesma localização e orientação onde foram realizadas as medições dos instrumentos.

O erro da MMC foi expresso na forma de tendência [6]. Para sua determinação (erro na medição de ângulos entre duas retas, conforme a estratégia adotada), foi utilizada a da Equação 2. Os resultados de tendência e incerteza de medição da MMC e é apresentada na Tabela 1.

$$T_{MMC} = \frac{\sum_{i=1}^N (I_{MMC})}{N} - \sin^{-1} \left(\frac{L}{X} \right) \quad (2)$$

Onde:

T_{MMC} = Tendência da MMC (°)

N = Número de medições realizadas

I_{MMC} = Ângulo indicados pela MMC (°)

L = Comprimento do certificado do bloco padrão = 69,99980 mm

X = Comprimento do certificado da régua de seno = 199,98737 mm

Tabela 1. Resultados da calibração da MMC

Valor médio indicado pela MMC (°)	Valor de Referência (°)	Tendência (")	U (")
20,48863	20,48861	0,1	3,0

4. RESULTADOS

Através da metodologia proposta conseguiu-se calibrar uma estação total com resolução de um segundo (1") e precisão de medição declarada pelo fabricante de 5" para a escala vertical. Foram calibrados os pontos de $\pm 20^\circ$ para a posição normal da luneta, que resulta nas indicações nominais 70° e 110°. E $\pm 20^\circ$ para a posição secundária da luneta (com rotação de 180° na escala vertical) que resulta nos pontos 250° e 290°. Os resultados são exibidos na Tabela. 2.

Como demonstrado na Tabela 1, o valor tendência da MMC é muito pequeno (10 vezes menor) se comparado a resolução do instrumento calibrado, por isso, não foi realizada a sua correção nas indicações da MMC. No entanto, a incerteza de calibração da MMC teve um valor considerável se comparado a resolução da estação total. Este valor é consequência das fontes de incerteza que influenciam a medição, como a repetitividade e a resolução angular da MMC (1"), entre outras fontes.

A incerteza expandida obtida para a calibração da estação utilizada neste trabalho foi de $U = 5''$, para um fator de abrangência $k = 2$, o qual corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

Tabela 2. Resultados da calibração da estação total

Ângulos (°)	Média (°)	Des. Pad (")	Tendências (")
90 - 70	19,99918	4,3	3,0
90 - 110	19,99979	1,7	0,7
270 - 250	20,00050	2,5	-1,8
270 - 290	19,99888	2,9	4,0

Os resultados mostram que o instrumento calibrado se encontra dentro das especificações do fabricante. Apesar do conceito de precisão não poder ser associado ao de exatidão, a Tabela 2 mostra que os valores das tendências não

ultrapassaram 5", o que se demonstrou satisfatório para o instrumento calibrado, pois o mesmo, como anteriormente mencionado, possui precisão de medição de 5".

5. CONCLUSÃO

Tendo em vista a necessidade de rastreabilidade de teodolitos e estações totais, este método tem grande importância quanto a inicialização do desenvolvimento de técnicas para a calibração da escala vertical desses instrumentos geodésicos. Fica claro que este método ainda não atende a todos os instrumentos, visto que existem no mercado equipamentos com resolução de até 0,1". Outro fator é metodologia baseada em medições por coordenadas, onde faz-se necessário o contato com a peça a ser medida e introduzindo erros que não seriam considerados se a medição fosse por processo óptico.

No entanto, pode-se concluir que o método de medição é suficientemente eficaz para atender aos objetivos de rastreabilidade de instrumentos com exatidão igual ou inferior a 5". Sendo assim, o Lamed se encontra apto para atender parte da demanda de calibração de teodolitos e estações totais.

O método apresentado também possui grande importância para realização de futuras comparações, com objetivo de validar outras metodologias de calibração de instrumentos geodésicos que vem sendo desenvolvidas pelo Lamed.

AGRADECIMENTOS

Ao corpo técnico do Laboratório de Metrologia Dimensional da Divisão de Metrologia Mecânica do Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial – LAMED / DIMEC / INMETRO. E ao Dr. Alessandro Marques pela inestimável colaboração.

REFERÊNCIAS

- [1] Branco, F. B. “*Calibração de Teodolitos*”. Dissertação de Mestrado em Metrologia para a Qualidade Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro Rio de Janeiro; 1990; 133 p.
- [2] Vieira, Luiz Henrique Brum. “*Metrologia dimensional: Realização das unidades de ângulo plano*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Niterói: UFF-CTC-TCE-TPP, 1996. 130 p.
- [3] International Organization for Standardization. ISO 10360-1: “*Geometrical Product Specifications (GPS) - Acceptance and reverification test for coordinate measuring machines (CMM) - Part 1: Vocabulary*”, 2000.
- [4] Hamburg-Piekar, D. S. “*Calibração de Peças Padrão em Máquinas de Medir por Coordenadas*”. Dissertação de Mestrado em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis; 2006; 152 p.

[5] Noronha, J.; Schneider, C.A. “*Calibração de Medidas Materializadas em Máquinas de Medir por Coordenadas*”. III Congresso Brasileiro de Metrologia, Recife, Brasil, 2003.

[6] Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2008). 1ª Edição Brasileira. Rio de Janeiro, 2009.