

Revista Brasileira de Cartografia (2011) N^o 63/5: 601-607
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

DETERMINAÇÃO DAS COMPONENTES DO ERRO CÍCLICO EM ESTAÇÕES TOTAIS LASER, UTILIZANDO INTERFERÔMETRO COMO PADRÃO METEOROLÓGICO

Cyclic Error Components Determination of Laser Total Stations, Using Interferometer as Metrological Standard

Wander da Cruz, Pedro Luis Faggion & Luis Augusto Koenig Veiga

Universidade Federal do Paraná - UFPR
Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Setor de Ciências da Terra - Departamento de Geomática
Caixa Postal 19001, CEP 81.531-990 Curitiba, PR, Brasil
wanderdacruz@gmail.com.br
faggion@ufpr.br
kngveiga@ufpr.br

Recebido em 18 Maio, 2009/ Aceito em 19 Fevereiro, 2010
Received on May 18, 2009/ accepted on February 19, 2010

RESUMO

O processo de calibração dos medidores eletrônicos de distância (MED), componente linear das estações totais, permite a determinação dos erros instrumentais que interferem na qualidade dos resultados obtidos nos levantamentos Topográficos e Geodésicos quando se utilizam estes equipamentos. Deste processo, que pode ser realizado com observações de campo ou de laboratório, são obtidos: Fator de escala (provocado pelo desgaste do cristal que gera a onda portadora), erro de zero (não coincidência do centro eletrônico do MED e o centro mecânico do Teodolito) e erro cíclico (amplitude e fase da onda portadora). Neste trabalho apresenta-se os procedimentos utilizados para a atualização na determinação dos elementos do erro cíclico em Estações Totais que utilizam portadora *Laser*. Até o presente momento, todos os desenvolvimentos realizados no Laboratório de Instrumentação Geodésica da UFPR buscando a calibração destes equipamentos estão fundamentados em MED que utilizam portadora infra-vermelho com frequência de operação de até 50 Mhz. Já os equipamentos que utilizam portadora *Laser* trabalham com frequência próximas de 100 Mhz. Com base nas condições dos equipamentos utilizados e também nos resultados obtidos, é possível verificar a validade das alterações propostas.

Palavras-chave: Calibração, Autocolimação, Interferômetro, Erro Cíclico.

ABSTRACT

The calibration process of the Electronic Distance Measurement (EDM) linear component of total stations, allows the determination of instrumental errors that affects the quality of results obtained in Land and Geodetic Surveying when such equipments are used. From this process, which can be accomplished either with field or laboratory observations, the following parameters are obtained: Scaling factor (caused by the waste of the crystal that generates the carrier wave), zero error (non-coincidence of the electronic and mechanical center of the EDM) and cyclic error (amplitude and phase of the carrier wave). This paper presents the procedures used to update the determination of elements of the cyclic error in total stations using carrier Laser. All developments seeking the calibration of these equipments, conducted at the

Laboratory of Geodesics Instrumentation of UFPR, are based on EDM that uses infra-red carrier with frequency operating at the range of up to 50 MHz. However, the equipment that uses laser carrier frequency works with frequency close to 100 Mhz. Based on the conditions of the equipment used and also the results, its possible verify the validity of the proposed changes.

Keywords: Calibration, Autocollimation, Interferometer, Cyclic Error.

1 INTRODUÇÃO

A Universidade Federal do Paraná possui um sistema para calibração de miras verticais de invar que é constituído por um Interferômetro Laser e um par de trilhos por onde se desloca o refletor móvel do interferômetro. Tal conjunto será utilizado para a determinação das componentes do erro cíclico em laboratório. Para isso, medem-se deslocamentos com o instrumento a ser calibrado e com instrumento de precisão (PACILÉO NETTO, 1990; RÜEGER, 1996; FAGGION, 2001).

Tendo em vista a precisão desejada na determinação dos deslocamentos, milésima parte do milímetro, estes trilhos devem estar perfeitamente alinhados e nivelados. Apesar de todo o cuidado tomado no momento do posicionamento dos mesmos, que estão apoiados sobre pilares engastados na laje do laboratório, permaneceram algumas irregularidades que provocam variações no deslocamento do refletor móvel causando variações nas distâncias.

O Erro Cíclico, um dos elementos passíveis de calibração em um MED, está relacionado com a medição interna da fase do sinal e é causado por um salto de fase no momento do envio e recepção do sinal. Este erro ocorre apenas em equipamentos que utilizam comparador de fase para determinar o tempo de deslocamento entre o envio, reflexão e retorno do sinal na medida da distância (GRIPP, 1986; PACILÉO NETTO, 1990; FAGGION, 2001). Maiores informações sobre os erros instrumentais na medição eletrônica de distância podem ser encontradas em Rüeger (1996), Miranda (2007) e Landgate (2009).

Seu comportamento pode ser representado por uma função senoidal, e seu comprimento de onda é igual a unidade de comprimento do MED. Nos equipamentos modernos, é geralmente inferior a 2mm (ACT, 2009).

Como o valor do erro cíclico é inversamente proporcional à intensidade do sinal refletido, assim, seus efeitos serão maximizados com o aumento da

distância medida (KHALIL, 2005). Portanto, este erro só é possível de ser detectado em distâncias superiores a 130m e em ambiente climatizado.

Utilizando um conjunto de espelhos montados ao longo do corredor de acesso ao laboratório de forma que a distância medida pelo MED seja superior a 130m e posicionando o prisma do equipamento que está sendo calibrado, sobre o refletor móvel do interferômetro, são medidos deslocamentos tanto pelo MED quanto pelo interferômetro, e na sequência realiza-se um ajustamento pelo método paramétrico, levando em conta essas medições, no qual tem como resultado a Amplitude e a Fase do erro cíclico (FAGGION, 2001).

A determinação das componentes do erro cíclico em laboratório baseia-se em um modelo matemático que relaciona os deslocamentos medidos com o instrumento que se deseja calibrar e estes mesmos deslocamentos medidos pelo interferômetro laser, que é usado como padrão devido à sua precisão.

Tais deslocamentos devem estar ao longo de uma distância igual a meio comprimento de onda da onda moduladora, e dividido de tal forma que seja suficiente para gerar uma população normal de resíduos (PACILÉO NETTO, 1990).

O procedimento de calibração adotado na UFPR foi desenvolvido e utilizado com equipamentos cujo comprimento de onda é de 6m. Por este motivo, eram realizadas as medições ao longo de 3m de comprimento, dividido em 20 trechos de 150mm (FAGGION, 2001). Atualmente, alguns equipamentos utilizam comprimento de onda de 3m.

A proposta deste estudo é adaptar os procedimentos definidos em estudos anteriores para esta nova realidade, tanto para a determinação do fator de escala, quanto para a determinação das componentes do erro cíclico. Com base nisto, foi definido que o deslocamento total a ser medido deve ser de 1,5m dividido em 20 trechos, o que resulta em medidas a cada 75mm.

2 METODOLOGIA

2.1 Nivelamento dos trilhos do interferômetro

2.1.1 Nivelamento dos trilhos com nível eletrônico

Tendo em vista a precisão desejada na determinação dos deslocamentos, milésima parte do milímetro, estes trilhos devem estar perfeitamente alinhados e nivelados. Apesar de todo o cuidado tomado no momento do posicionamento dos mesmos, que estão apoiados sobre pilares engastados na laje do laboratório, permaneceram algumas irregularidades que provocam variações no deslocamento do refletor móvel causando variações nas distâncias.

Com objetivo de minimizar possíveis erros causados pela imperfeição dos trilhos do interferômetro, foi utilizado o nível eletrônico Talyvel 3, da empresa Taylor Robson. Este equipamento, com o sensor posicionado em um suporte sobre o refletor móvel do interferômetro, fornece a inclinação para cada posição ocupada com precisão de 1" de arco (figura 1).

Para realização deste nivelamento, o nível deve estar configurado para leitura em segundos de arco. O valor da inclinação (α) entre os pontos é obtido na unidade de leitura do nível e a distância entre as posições de medida da inclinação é obtida com o interferômetro. Para a horizontalização dos deslocamentos do refletor móvel utiliza-se a seguinte equação (equação 1):

$$Dh = Di \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (1)$$

Onde:

Dh = distância horizontal;

Di = Distância inclinada;

α = desnível entre pontos A e B em radianos.

2.1.2 Nivelamento dos trilhos utilizando autocolimador

A outra forma de nivelamento utilizada foi a autocolimação. Neste método, utiliza-se um autocolimador associado a um teodolito de precisão, no caso, o Wild T2, com precisão de 1" .

O princípio de funcionamento do autocolimador consiste pode ser explicado da seguinte maneira:

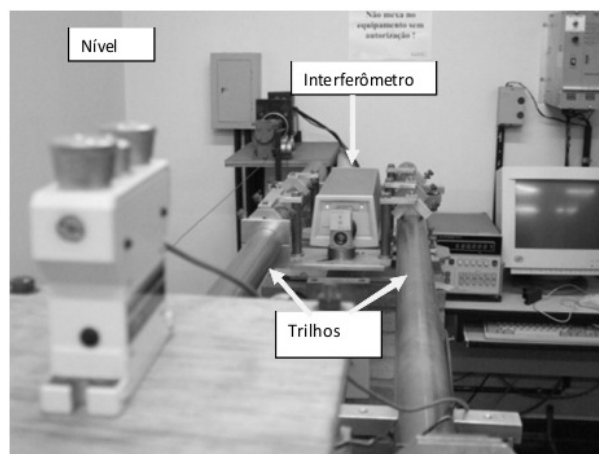


Fig. 1 – Nível e interferômetro.

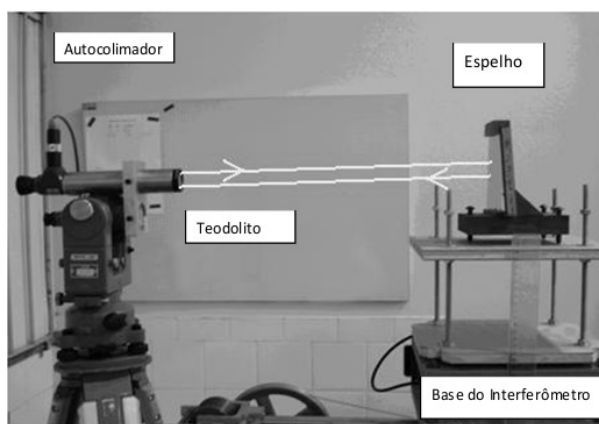


Fig. 2 – Sinal luminoso refletindo no espelho.

- O autocolimador emite um feixe luminoso em forma de retículo, que é refletido em um espelho sobre a base móvel do interferômetro (Figura 2);

- Esse retículo é visualizado na ocular do próprio equipamento (Figura 3A);

- Assim, alinhando-se o retículo refletido com o retículo da ocular, utilizando o teodolito associado, posiciona-se o autocolimador paralelo a inclinação da base móvel (Figura 3B);

- Feito isso, lê-se diretamente o valor da inclinação no círculo vertical do teodolito.

Os desníveis são calculados utilizando a equação (2):

$$\Delta h = d \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (2)$$

onde:

d-distância entre os pontos P_n e P_0

α -diferença de ângulo vertical (zenital) entre os pontos $\alpha = P_n - P_0$.

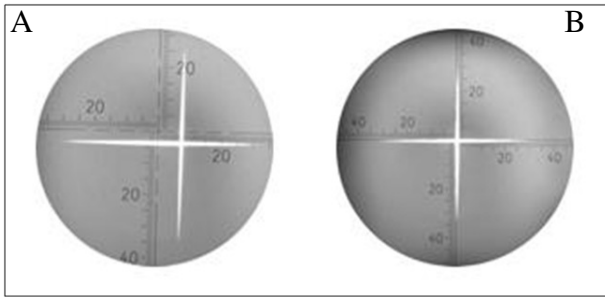


Fig. 3 – Feixe refletido.

2.2 Procedimento para a Determinação das Componentes Do Erro Cíclico

Visando a realização deste procedimento, determinou-se neste trabalho novo intervalo a ser medido, levando em consideração o comprimento de onda atual. O valor definido foi de 75mm, o que possibilitou a realização de vinte medidas, gerando uma população normal de resíduos.

Utilizando um conjunto de espelho, a fim de formar uma distância superior a 100m, mediu-se os deslocamentos, que aplicados a formulação matemática citada por Gripp (1986), Paciléo Netto (1990), Cordini (1991), Rüeger (1996), Faggion (2001) entre outros, resultam na amplitude e fase do erro cíclico.

$$D_i = D_0 + d_i + Ec_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

onde:

D_i = Distâncias obtidas com o instrumento a ser calibrado;

D_0 = Distância medida com o MED na origem do sistema. Neste ponto não existe deslocamento registrado pelo interferômetro;

d_i = Deslocamento do refletor medido com o interferômetro;

Ec_i = Erro cíclico correspondente à distância D_i .

n = Número de posições ocupadas pelo instrumento que está sendo calibrado;

O erro cíclico é dado por:

$$Ec_i = A \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi d_i}{\lambda'} \right) + \left(\frac{2\pi B}{\lambda'} \right), \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

onde:

Ec_i = Erro cíclico correspondente à distância D_i ;

A = Amplitude do erro cíclico;

d_i = Deslocamento do refletor medido com o interferômetro;

λ' = Meio comprimento de onda de modulação;

B = Ângulo de fase inicial;

n = Número de posições ocupadas pelo instrumento que está sendo calibrado.

Substituindo a equação (4) na equação (3), chega-se a expressão para o cálculo dos elementos do erro cíclico:

$$D_i = D_0 + d_i + A \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi d_i}{\lambda'} \right) + \left(\frac{2\pi B}{\lambda'} \right) \quad (5)$$

Admitindo-se que:

$$\theta = \left(\frac{2\pi B}{\lambda'} \right) \quad (6)$$

$$\theta_0 = \left(\frac{2\pi d_i}{\lambda'} \right) \quad (7)$$

Aplicando (6) e (7) em (4), e realizando as devidas deduções algébricas, tem-se:

$$Ec_i \cdot A \operatorname{sen}(\theta + \theta_0) = A \cdot \operatorname{sen}\theta \cdot \cos\theta_0 + A \cdot \cos\theta \cdot \operatorname{sen}\theta_0 \quad (8)$$

$$Ec_i = \operatorname{sen}\theta \cdot A \cdot \cos\theta_0 + \cos\theta \cdot A \cdot \operatorname{sen}\theta_0 \quad (9)$$

Onde:

θ = Ângulo de fase;

θ_0 = Ângulo de fase inicial;

A = Amplitude do erro cíclico;

λ = Comprimento de onda.

Considerando-se ainda que:

$P_i = \operatorname{sen}(\theta)$;

$Q_i = \cos(\theta)$;

$X = A \cdot \cos(\theta_i)$;

$Y = A \cdot \operatorname{sen}(\theta_i)$.

Onde:

θ_i = Ângulo de fase na posição (i-1) sendo que θ_i é o ângulo de fase na posição inicial.

Substituindo os termos P_i, Q_i, X e na equação (9), chega-se a equação (10).

$$E_i = P_i X + Q_i Y \quad (10)$$

Considerando estas transformações, a equação de origem (3) toma agora a seguinte configuração:

$$D_i = D_0 + d_i + P_i X + Q_i Y \quad (11)$$

Os valores de X e Y são os parâmetros a ser determinados por ajustamento, que neste trabalho, será pelo método paramétrico.

Aplicando-se os valores citados anteriormente nas equações (10) e (11) a seguir, obtêm-se as componentes do erro cíclico.

A amplitude do erro cíclico, em milímetros, e dada por:

$$A^2 = X^2 + Y^2 \quad (12)$$

e o ângulo de fase do erro cíclico, em radianos, é dado por:

$$B = \theta = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (13)$$

3 RESULTADOS

3.1 Alinhamento dos trilhos

Foram realizadas algumas sessões de nivelamento dos trilhos do interferômetro para buscar o melhor valor dos deslocamentos horizontais. No quadro 1, são apresentados os resultados obtidos nos dois métodos de nivelamento (QUADRO 1).

Cabe salientar que os valores entre 1100 e 3000 foram suprimidos devido a grande quantidade de informação, porém a figura 4 mostra um gráfico no qual é possível analisar seu comportamento ao longo de toda a extensão do trilho (figura 4).

3.2 Elementos do Erro Cíclico e Fator de Escala

As primeiras medições para a determinação dos elementos do erro cíclico foram realizadas utilizando estações totais laser Leica TCR 407 POWER e TCRA 1205. Parte deste procedimento pode ser observado na figura 5.

Quadro 1. Desnível entre os pontos.

Posição do refletor (mm)	Desnível Talyvel (mm)	Desnível autocolimação (mm)
0	0	0
100	0	-0,001
200	-0,08	-0,019
300	-0,136	-0,057
400	-0,17	-0,058
500	-0,09	-0,058
600	-0,118	-0,056
700	-0,117	-0,091
800	-0,076	-0,012
900	-0,184	-0,131
1000	-0,462	-0,362
...
3100	-0,334	-0,255
3200	-0,268	-0,335
3300	-0,282	-0,198
3400	-0,352	-0,48
3500	-0,407	-0,445
3600	-0,465	-0,476
3700	-0,531	-0,563
3800	-0,466	-0,588
3900	-0,285	-0,458
4000	-0,184	-0,297



Fig. 4 – Gráfico dos desníveis do trilho.

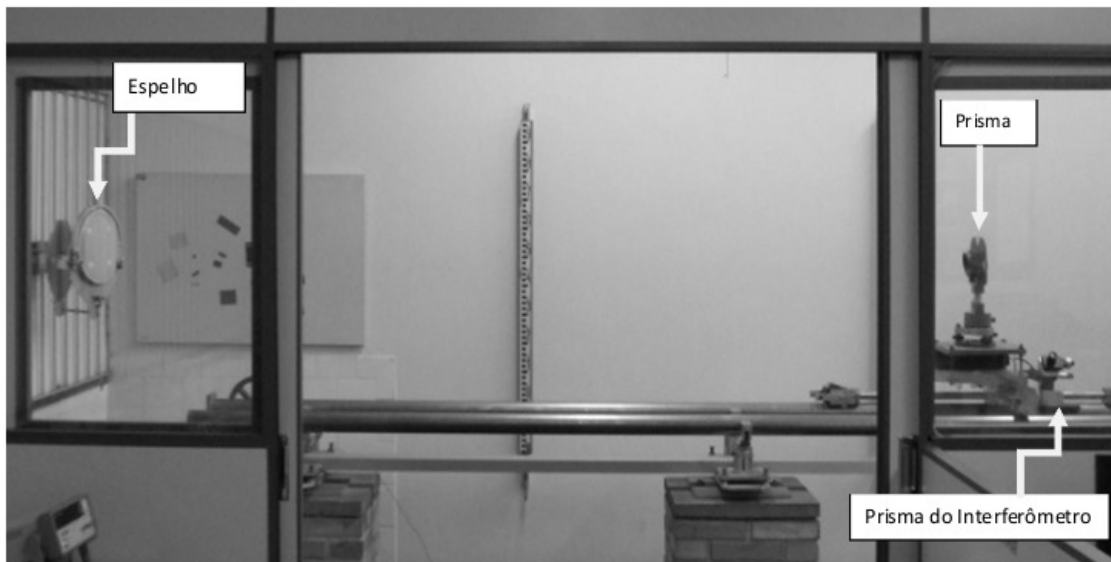


Fig. 5 – Medição de deslocamentos e frequência.

No quadro seguinte (QUADRO 2), estão apresentados os valores dos deslocamentos medidos com o interferômetro e com a estação total TCRA 1205.

Os deslocamentos medidos com o interferômetro já estão corrigidos dos efeitos dos desníveis. Nas Figuras 6 e 7, percebe-se o comportamento cíclico nas medidas com as estações totais.

O Quadro 3 mostra os valores dos elementos do erro cíclico determinados neste experimento. A coluna “modo” refere-se ao modo de medição selecionado: com prisma (CP) ou sem prisma (SP).

4. CONCLUSÕES

Com base nas informações coletadas, pode-se verificar uma discrepância relativamente grande no valor do desnível para a posição 1200mm. Tal fato ocorre em virtude de uma junção do trilho.

O resultado obtido para amplitude e fase do erro cíclico está dentro da precisão nominal dos equipamentos testados. Isso ocorre em virtude destes equipamentos serem novos e com pouca utilização, tendo em vista que esta tecnologia é recente.

Com base neste fato, conclui-se também que a alteração efetuada nos deslocamentos medidos, bem como no programa de processamento da

calibração, está de acordo com o modelo matemático adotado.

Quadro 2. Deslocamentos.

Posição no interferômetro (mm)	Deslocamentos - Interferômetro (mm)	Deslocamentos - Estação Total (mm)
2200		
2275	75,005	74,9
2350	75,005	74,967
2425	74,996	75,2
2500	74,996	74,867
2575	75	75,067
2650	75	75,033
2725	75,001	74,9
2800	75,001	74,833
2875	74,999	74,967
2950	74,999	75
3025	75	74,867
3100	75	74,933
3175	75,002	75,033
3250	75,002	74,833
3325	74,995	75,1
3400	74,995	75
3475	75,002	74,933
3550	75,002	75,167
3625	75,005	74,8
3700	75,005	74,933

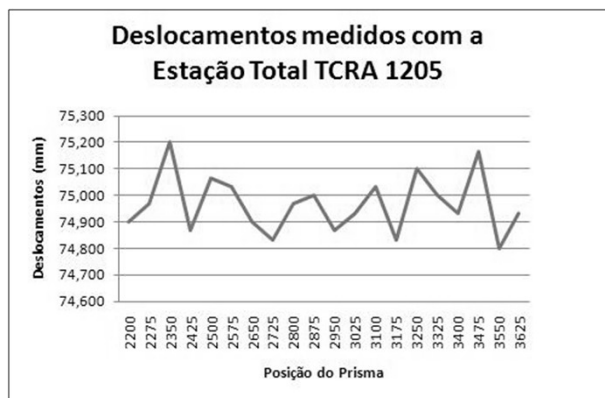


Fig. 6 – Medição de deslocamentos (TCRA 1205).

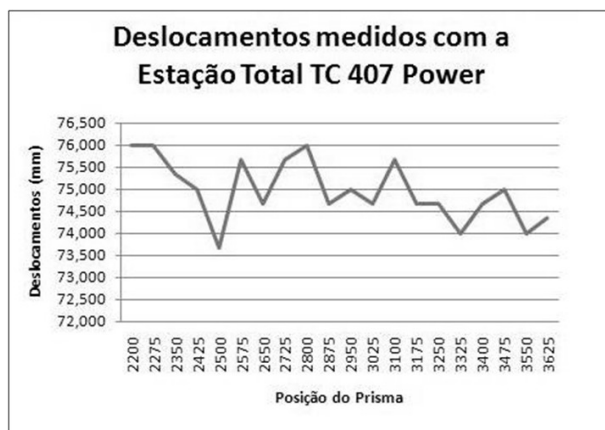


Fig. 7 – Medição de deslocamentos (TC 407 Power).

Quadro 3. Elementos do erro cíclico.

Estação Total	Modo	Amplitude (mm)	Ângulo de fase (rd)
TCRA 1205	CP	0,030 $\sigma=0,000$	-1,571 $\sigma=0,205$
	SP	0,120 $\sigma=0,000$	-1,571 $\sigma=58,494$
TCR 407 Power	CP	0,477 $\sigma=91,761$	0 $\sigma=0,149$
	SP	0,477 $\sigma=137,641$	0 $\sigma=0,223$

AGRADECIMENTOS

Este trabalho tem a cooperação e suporte da Universidade Federal do Paraná, através do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e do Departamento de Geomática, que colocam a disposição as instalações e equipamentos do Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) e Laboratório de Topografia (LABTOPO).

O apoio financeiro para a realização dos estudos é disponibilizado através de bolsa pelo CNPq, projeto n°: 476237/2008-4, título:

Calibração da componente linear das Estações Totais com observação de campo e laboratório.

REFERÊNCIAS

ACT Planning & Land Authority. **EDM CALIBRATION HANDBOOK**. Surveying and Spatial Data. 7th ed. 2009. Disponível em <http://www.actpla.act.gov.au/__data/assets/pdf_file/0019/9451/edm-handbook.pdf>. Acesso: abril, 2010.

FAGGION, P. L. **Obtenção dos elementos de calibração e certificação de medidores eletrônicos de distância em campo e laboratório**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra. Curitiba, 2001.

RIPP, J. Jr. **Calibração de Distanciômetros Eletrônicos com medidas de campo**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1986.

KHALIL, R. **New Compact Method for Laboratory Testing EDM Instruments**. FIG Working Week 2005 and GSDI-8. From Pharaohs to Geoinformatics, Cairo, Egipt. April 16-21, 2005. Disponível em: <kau.edu.sa/Files/0052473/Researches/30527_03_Testing_EDM.pdf>. Acesso em: março, 2010.

LANDGATE. **Calibration of Electronic Distance Measurement Instruments**. Western Australian Land Information Authority. 2009. Disponível em: <[http://www.landgate.wa.gov.au/docvault.nsf/web/PS_Survey_EDM_Calibration_Software/\\$FILE/EDMCalibration.pdf](http://www.landgate.wa.gov.au/docvault.nsf/web/PS_Survey_EDM_Calibration_Software/$FILE/EDMCalibration.pdf)>. Acesso em: março, 2010.

MIRANDA, F. A. **Metodologia para o monitoramento de pontos em áreas instáveis empregando-se estações totais**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

PACILÉO NETTO, N. **Calibração de medidores eletrônicos de distância, construção de uma base multipilar na USP e metodologia de aferição**. São Paulo, 1990. Tese de Doutorado, E. POLI/USP.

RÜEGGER, J. M. **Electronic Distance Measurement**. 3th ed., Springer-Verlag, Berlin. 1996.