

Revista Brasileira de Cartografia (2017), Nº 69/7: 1277-1286
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ANÁLISE DA ACURÁCIA DE OBSERVAÇÕES COM UMA ESTAÇÃO TOTAL ROBÓTICA EM ENSAIO CONTROLADO DE DESLOCAMENTO

*Analysis of the Accuracy of Observations with a Robotic Total Station in a
Controlled Displacement Test*

Nemer Ricardo Amaral Ferreira & João Carlos Chaves

¹Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT / Curso de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
Rua Roberto Simonsen, 305 CEP 19060-900 Presidente Prudente SP - Brasil
{nemer, jechaves}@fct.unesp.br

Recebido em 12 de Dezembro, 2016/ Aceito em 9 de Janeiro, 2017
Received on December 12, 2016/ Accepted on October 9, 2017

RESUMO

Estruturas artificiais (pontes, edifícios, barragens, etc.) ou naturais (placas litosféricas, superfícies com risco de desmoronamento, vulcões, etc.) sempre estarão sujeitas a mudanças em suas dimensões, tanto na forma, como no tamanho ou na posição devido a ação humana ou da própria natureza. Por isso estas estruturas merecem acompanhamento ao longo do tempo, ajudando na identificação de problemas e portanto contribuindo com que acidentes possam ser evitados. Para Kuang (1996) qualquer medida, mesmo aquelas com instrumentos de tecnologias mais recentes, há de se considerar erros inerentes ao processo de medição, os quais são causados por fatores instrumental, do meio ambiente ou de limitação humana. Estes erros, portanto, devem ser eliminados ou minimizados, para que se tenha maior confiabilidade nos dados coletados em campo e que servirão de análise para estudo das variações dimensionais de uma estrutura. Analisar a acurácia das observações com o equipamento que se está trabalhando, portanto, é necessário no controle de estruturas. Esta pesquisa tem o objetivo de apresentar a acurácia de observações coletadas com uma Estação Total Robótica (ETR) com a finalidade de modelar erros que comprometam a investigação de deslocamento, usando como referência Kuang (1996). As precisões angulares e lineares informadas pelo fabricante do equipamento foram a base para o chamado processo de análise de acurácia das observações *a priori*. Nesta fase, equacionou-se os erros de acordo com suas fontes. No caso da estação total suas observáveis (direções e distâncias) têm suas fontes de erros. As direções sofrem influências dos erros de pontaria, de nivelamento e de leitura, ou seja, os chamados erros internos (relativo ao instrumento ou ao observador) e, também, dos erros externos (relativo a outros fatores) que são o erro de centragem e da refração atmosférica. Os erros que afetam a medida linear também são divididos em componentes internos (o erro zero, o erro cíclico e o erro de medida da fase) e externos (refração atmosférica). Na sequência, conforme Kuang (1996), aplicou-se a análise de acurácia das observações *a posteriori* para a determinação da variância em função do erro verdadeiro e modelada dos erros vistos anteriormente. Foi realizado um experimento para analisar os resultados de acordo com os procedimentos de modelagem executados. Neste experimento um deslocamento simulado na ordem da dezena do centímetro (medida feita com um paquímetro) foi detectado por cálculos a partir dos dados obtidos pela ETR com erro na ordem do milímetro e com diferença na ordem do décimo do milímetro em relação a equipamentos que foram considerados como referência e que também coletaram dados nesta simulação. Assim, nesse trabalho entende-se ter elencado as influências dos erros sistemáticos e aleatórios nas observações coletadas com o equipamento utilizado. Importante enfatizar que a essência deste estudo vale para qualquer tipo de equipamento, em qualquer trabalho que se busque acurácia das observações.

Palavras-chave: Acurácia, Erros, ETR, Monitoramento de Estruturas.

ABSTRACT

Artificial structures (bridges, buildings, dams, etc.) or natural structures (lithospheric plates, collapsed surfaces, volcanoes, etc.) will always be subject to changes in their dimensions, shape, size or position due to human action or nature itself. Therefore, these structures deserve follow-up over time, helping to identify problems and therefore contributing to the avoidance of accidents. For Kuang (1996) any measure, even those with newer technology instruments, must be considered errors inherent in the measurement process, which are caused by instrumental, environmental or human limiting factors. These errors, therefore, must be eliminated or minimized, in order to have greater reliability in the data collected in the field and that will serve as analysis to study the dimensional variations of a structure. Analyzing the accuracy of the observations with the equipment that is being worked, therefore, is necessary in the control of structures. This research has the objective of presenting the accuracy of observations collected with a Robotic Total Station (RTS) purpose of modeling errors that compromise the displacement investigation, using as reference Kuang (1996). The angular and linear accuracies reported by the equipment manufacturer were the basis for the so-called accuracy analysis process of a priori observations. At this stage, the errors were considered according to their sources. In the case of the total station its observables (directions and distances) have their sources of errors. The directions are influenced by errors in aiming, leveling and reading, that is, the so-called internal errors (relative to the instrument or the observer) and also the external errors (relative to other factors) that are the error of centering and of atmospheric refraction. The errors that affect linear measurement are also divided into internal components (zero error, cyclic error and phase measurement error) and external (atmospheric refraction). Following, according to Kuang (1996), the accuracy analysis of the a posteriori observations was applied for the determination of the variance as a function of the true and modeled error of the errors seen previously. An experiment was performed to analyze the results according to the modeling procedures performed. In this experiment a simulated displacement in the order of ten centimeters (measured with a calliper) was detected by calculations from the data obtained by the RTS with error in the order of millimeters and with a difference in the order of tenth of a millimeter in relation to equipment that was considered as reference and who also collected data in this simulation. Thus, in this work it is understood to have listed the influences of systematic and random errors in the observations collected with the equipment used. It is important to emphasize that the essence of this study is valid for any type of equipment, in any work that seeks accuracy of the observations.

Keywords: Accuracy, Errors, RTS, Monitoring Structures.

1. INTRODUÇÃO

Em monitoramento de estruturas, por exemplo, a utilização de instrumentos de medição dos mais variados tipos podem ser empregados: teodolito, nível, estação total e, mais recentemente, a tecnologia GNSS (*Global Navigation Satellite System*), o *laser scanner* e a ETR (Estação Total Robótica). Para Kuang (1996) qualquer medida há de se considerar erros inerentes ao processo de medição, os quais são causados por fatores instrumentais, do meio ambiente ou de limitação humana. Estes erros, portanto, devem ser eliminados ou minimizados, para que se tenha maior confiabilidade nos dados coletados em campo e que servirão de análise para estudo das variações dimensionais de uma estrutura.

Um crescente número de experimentos e pesquisas de campo que foram feitos com base em instrumentos de gravação automática. Psimoulis e Stiros (2007) realizaram medições com uma ETR para detectar deflexões e a frequência de oscilação de estruturas de

engenharia e concluíram que o instrumento pode ser utilizado para medir pequenas amplitudes (ordem de milímetros) e frequência de oscilação das estruturas maiores que 1 Hz.

Em 2011, Moschas e Stiros detectaram aproximadamente seis milímetros de amplitude de oscilação e 4,3 Hz de frequência, em uma ponte rígida de pedestres com 40 metros de extensão, utilizando GPS e um acelerômetro, mostrando que pode-se detectar o deslocamento dinâmico não só de arranha-céus, pontes estaiadas ou outras estruturas flexíveis, mas também de estruturas rígidas como esta ponte. Psimoulis e Stiros (2013), também buscando a identificação de deslocamento dinâmico em estruturas relativamente rígidas, monitoraram, fazendo uso da ETR, uma ponte ferroviária em resposta à passagem do trem. Foi detectado 1,3 milímetros imediatamente antes à passagem, e picos de 2,5 a 6 mm com a passagem de pequenos e grandes vagões, respectivamente. Os resultados justificam a utilização da ETR para monitoramento da integridade estrutural investigada.

Neves *et al.* (2014) apresentou um estudo de caso para determinar se existia deslocamentos de pontos localizados em blocos que formam uma barragem da Usina Hidroelétrica de Salto Caxias no estado do Paraná. Utilizou para tanto uma ETR. Para o tempo em que durou a pesquisa foi concluído que não houve deslocamento significativo e que o instrumento atendeu a demanda requerida.

O tratamento das observações com o equipamento que se está trabalhando, portanto, é fundamental no controle de estruturas, pois, os dados obtidos devem fornecer informações acuradas para análise posicional de pontos localizados nesta estrutura. O problema, então, é interpretar e tratar corretamente os dados coletados, diferenciando o que é realmente deslocamento e o que é ruído de medição.

Chrzanowski (1977) foi um dos pioneiros a tratar da análise de erros em topografia, equacionando os efeitos destes nos dados observados em campo para os instrumentos utilizados até então. Kuang (1996) fundamentou-se no próprio Chrzanowski para analisar a acurácia das observações levando em consideração os instrumentos disponíveis à época, buscando a identificação do efetivo peso dos erros originários destes equipamentos no processo de monitoramento.

Este trabalho vem portanto abordar os erros presentes num processo de medição, de forma a modelá-los, possibilitando assim avaliar a acurácia das observações obtidas. Foi realizado para este fim um ensaio controlado de deslocamento no qual se empregou uma ETR modelo *IS 203* da marca *Topcon*, para a tomada de dados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir será abordada uma revisão teórica sobre os assuntos tratados nesta pesquisa.

2.1 Análise da acurácia de observações

Existem diversas técnicas de observação que podem ser usadas para o levantamento de dados na Geodésia e na Topografia. De modo geral, elas podem ser divididas em duas grandes áreas: observações terrestres convencionais (azimutes, distâncias, ângulos verticais, direções horizontais e desníveis) e observações espaciais (pseudodistância e diferença de fase a partir

de satélites artificiais). Em tais medidas, com qualquer que seja o equipamento empregado, devem ser conhecidos os erros existentes e assim não comprometer a análise final do estudo.

2.1.1 Acurácia de observações à priori

Informações sobre a acurácia esperada das observações podem ser obtidas antes mesmo da realização das medições, ou seja, a precisão do equipamento, conforme as especificações do fabricante, torna isso possível.

De acordo com Kuang (1996), a precisão de um instrumento informada pelo fabricante, representa em geral, uma condição padrão e pode ser significativamente diferente das condições onde as observações são feitas.

A seguir, os erros associados às medições angulares e lineares, são apresentados.

2.1.1.1 Medidas angulares

Nenhum sistema de medição angular (teodolito) mecânico e/ou óptico é isento de erros de medição, mesmo que o teodolito esteja retificado, e que outros erros possam ser eliminados por métodos de observação adequados. Neste estudo, foram considerados, de acordo com Kuang (1996), erros internos relacionados com o instrumento e/ou observador conhecidos como: erro de pontaria, erro de leitura e erro de nivelamento do instrumento, e os erros externos relacionados ao ambiente: o erro de centragem e a refração atmosférica (KUANG, 1996). A seguir, é apresentado o efeito de cada fonte de erro de observações, podendo, assim, ser calculada a variância das mesmas.

2.1.1.1.1 Erro de pontaria

O erro de pontaria (σ_p) é definido por Kuang (1996), como o erro de pontaria em um alvo. A ocorrência deste tipo de erro surge devido à limitação da resolução óptica do instrumento, à limitação óptica do observador e às mudanças das condições atmosféricas. Em condições de baixa visibilidade ou de grandes variações térmicas o erro esperado será maior. De acordo com Chrzanowski (1977) o erro de pontaria (σ_p) em uma visada simples com uma distância de pouco mais de 100 m é estimado por:

$$\sigma_p = \frac{30''}{M} \text{ até } \sim \sigma_p = \frac{60''}{M} \quad (1)$$

onde M é a ampliação telescópica (aumento da luneta) do instrumento. Por utilizar um instrumento robótico, com sensor automático, as pontarias para todas as coletas foram realizadas pelo próprio aparelho. O manual do equipamento apresenta o erro que se comete ao utilizar essa função.

2.1.1.1.2 Erro de leitura

O erro de leitura (σ_r) refere-se a incapacidade do observador de repetir a mesma leitura (KUANG, 1996). Este tipo de erro, quando se utiliza instrumentos ópticos-mecânicos, ocorre em função da menor contagem ou menor divisão angular do equipamento. Ele pode ser agravado por erro de gradação do limbo horizontal ou escala micrométrica. Em instrumentos usando coincidência micrométrica, o erro de leitura esperado é (tipicamente para instrumentos de $d = 1''$ ou $0.5''$):

$$\sigma_r = 2.5d'' \quad (2)$$

onde d é a menor contagem/divisão em segundos de arco do instrumento.

2.1.1.1.3 Erro de nivelamento do instrumento

O erro de nivelamento (σ_v), de acordo com Kuang (1996), é causado por insensibilidade do nível de bolha usado para nivelar o instrumento. O valor angular necessário para que se possa deslocar a bolha, conforme as marcas de divisão, no topo da bolha de nível, é o valor da sensibilidade da bolha de nível. Para Chrzanowski (1977), a acurácia para o nivelamento (σ_v do equipamento) é estimada em:

$$\sigma_v = 0.2v \quad (3)$$

onde v é o valor da divisão da bolha do nível em segundos de arco.

2.1.1.1.4 Efeitos do erro de centragem

Segundo Kuang (1996), o efeito do erro de centragem (σ_c) refere-se a incapacidade para alinhar exatamente o centro do instrumento e/ou do alvo com a marca do levantamento. A influência na magnitude do erro de centragem depende do tipo de aparelho, assim como o método utilizado. Estando o equipamento em boas condições de uso e considerando que não

há vento, de acordo com Chrzanowski (1977), o erro de centragem esperado para diferentes tipos de centragem tem as seguintes magnitudes, conforme Tabela 1:

Tabela 1: Magnitude do erro de centragem

Método de centragem	Erro esperado
Fio de prumo	1 mm/m
Prumo ótico	0,5 mm/m
Prumo de bastão	0,5 mm/m
Centragem forçada	0,1 mm

Fonte: Chrzanowski (1977).

2.1.1.1.5 Efeitos da refração atmosférica

A radiação propagada através de infinitas regiões atmosféricas sofre algumas mudanças, tanto em velocidade como em direção, devido a refração causada por densidades heterogêneas do ar (KUANG, 1996). Desta forma, pode-se considerar que ao se fazer uma visada na atmosfera, esta não segue um caminho reto devido a refração atmosférica e o valor de curvatura que a medida sofre pode diferir, consideravelmente, de um ponto para outro, ao longo da linha de visada, em instantes diferentes durante o trabalho.

Segundo Kuang (1996), o índice de refração no ar, pode ser expresso por:

$$n = 1 + (n_g - 1) \frac{273,16p}{(273,16 + t)1013,25} - \frac{11,20 \times 10^{-6}}{(273,16 + t)^2} e \quad (4)$$

onde n é o índice de refração do grupo válido para as condições atmosféricas descritas por t , p e e , que representam a temperatura do ar (em °C), a pressão atmosférica (em mb) e a pressão parcial do vapor d'água (em mb), respectivamente e, e é do índice de refração do grupo calculado nas seguintes condições: 0°C, 1013,25 mb e 0,03% de CO_2 .

O valor da pressão parcial do vapor d'água pode ser expresso por (TETENS, 1930):

$$e = \frac{6,1078 \cdot e^{\left(\frac{17,269T}{T+237,3}\right)} \cdot UR}{100} \quad (5)$$

onde, T é a temperatura em Celsius (°C) e UR é a umidade relativa do ar (%).

A refração atmosférica é representada, frequentemente, em termos de coeficiente de refração (k), que de acordo com Kuang (1996), em condições padrão, o valor de k é 0,13 para o

instrumento que utiliza o espectro visível e de 0,25 para equipamentos microondas.

Para o espectro visível e próximo ao infra-vermelho, o padrão do grupo do índice de refração (n_g) é calculado usando a seguinte equação (RÜEGGER, 1980):

com λ sendo o comprimento de onda, em micrômetros, da luz no vácuo.

$$n_g = \left[287,604 + 3 \left(\frac{1,6288}{\lambda^2} \right) + 5 \left(\frac{0,0136}{\lambda^4} \right) \right] \times 10^{-6} + 1 \quad (6)$$

2.1.1.1.6 Acurácia estimada de medidas angulares

Determinado os efeitos de todos os erros internos e externos de uma observação angular, pode-se calcular a acurácia *a priori*. Os efeitos de erros de diferentes origens na medida angular podem ser assumidos estatisticamente independentes, o efeito total, a variância em uma observação pode ser calculada, de acordo com a lei de propagação de erros aleatórios, como a somatória do quadrado de cada efeito individual (KUANG, 1996). Segundo Kuang (1996) a variância na medição de uma direção angular horizontal *a priori* obtida com base em uma única visada é estimada por:

$$\sigma_{d_i}^2 = \sigma_p^2 + \sigma_r^2 + \sigma_v^2 \cot^2 Z + (\rho'')^2 \frac{2\sigma_c^2}{s^2} + \left(\frac{s}{2R} \right)^2 \sigma_{kh}^2 \quad (7)$$

onde σ_p , σ_r , σ_v , σ_c e σ_{kh} representam, respectivamente, erro de pontaria, erro de leitura, erro de nivelamento do instrumento, erro de centragem do instrumento e alvo e erro na determinação do coeficiente de refração lateral; s e Z são, respectivamente, o comprimento e o ângulo zenital da linha de visada; K_h é o coeficiente de refração lateral e R equivale ao raio médio da Terra.

Como um ângulo horizontal é a diferença de duas direções horizontais, a variância em um ângulo horizontal deriva de duas direções que são obtidas por visadas simples, pode ser determinada por:

$$\sigma_{\beta_i}^2 = 2(\sigma_p^2 + \sigma_r^2 + \sigma_v^2 \cot^2 Z) + (\rho'')^2 \frac{4\sigma_c^2}{s^2} \left(1 - \frac{\cos \beta}{2} \right) + 2 \left(\frac{s}{2R} \right)^2 \sigma_{kh}^2 \quad (8)$$

No entanto, a última parcela dessa equação, que é dependente da incerteza do coeficiente de refração horizontal (σ_{kh}) foi negligenciada pois, segundo Kuang (1996), a única forma de se conhecer o gradiente de temperatura é observar

a temperatura ao longo da linha de visada, como na prática isso é inviável, recomenda-se evitar situações em que a linha de visada passe por lugares de anomalias de temperatura. Como no experimento a região de trabalho não apresenta meios diferentes (rios, túneis, etc) e a distância é relativamente curta, a Equação 8 passou a ser:

$$\sigma_{\beta_i}^2 = 2(\sigma_p^2 + \sigma_r^2 + \sigma_v^2 \cot^2 Z) + (\rho'')^2 \frac{4\sigma_c^2}{s^2} \left(1 - \frac{\cos \beta}{2} \right) \quad (9)$$

2.1.1.2 Medidas Lineares

De maneira similar às medidas angulares, os erros que afetam as medidas lineares podem ser divididos em internos e externos. Para os instrumentos eletro-ópticos, os erros internos foram identificados como erro zero, erro cíclico e erro de medida de fase, que são principalmente, devido às imperfeições do instrumento utilizado, enquanto os erros externos são principalmente, devido à refração atmosférica (KUANG, 1996).

2.1.1.2.1 Erro zero

O erro zero (σ_0), de acordo com Kuang (1996), resulta da diferença entre o centro elétrico e geométrico do instrumento. O erro zero é determinado pelo fabricante do instrumento, e o valor deste é pequeno para instrumentos que utilizam ondas de luz, porém pode ser significativo para instrumentos que usam microondas. Tomando o erro zero (z_0) na medida de uma distância, este pode ser corrigido aplicando:

$$\delta_{z_0} = -z_0 \quad (10)$$

Neste trabalho, tal erro foi desconsiderado, já que o fabricante em seu manual não traz a informação, além do que o instrumento utiliza ondas de luz e, portanto, pode ser considerado não significativo tendo em vista a ordem de grandeza do deslocamento que se quer determinar neste estudo, no caso dezenas de centímetros.

2.1.1.2.2 Erro cíclico

O erro cíclico (σ_{ci}) pode ser modelado sobre a unidade de medida definida do instrumento por uma função senoidal, como dada pela equação a seguir (RÜEGGER, 1980):

$$s_i = s_1 + x_{ref} - A \sin \left[\frac{2\pi}{U} (s_i + B) \right] \quad (11)$$

onde, U é a unidade do comprimento de onda, A a amplitude da correção do erro cíclico, B a fase da correção do erro cíclico, s_i a distância do instrumento para a posição do primeiro prisma; s_j a distância medida da posição do prisma atual e, finalmente, x_{ref} é a distância conhecida entre a posição atual do prisma e a primeira posição do prisma. Porém, segundo Khalil (2005 apud Cruz, Faggion Veiga, 2011) como o valor do erro cíclico é inversamente proporcional à intensidade do sinal refletido, tal efeito é maximizado com o aumento da distância, portanto este erro só é possível de ser detectado em distâncias superiores a 130 m e em ambiente climatizado.

2.1.1.2.3 Erro na medida de fase

O erro de medição na diferença de fase, de acordo com Kuang (1996), é devido a resolução limitada da técnica de medição usada. Este erro tem natureza aleatória. Dependendo do método utilizado, a acurácia na determinação da diferença de fase ($\Delta\Phi$) pode variar. O método digital de detecção de fase, em que é usado um equipamento infravermelho moderno, fornece uma resolução de 0,001 até 0,0003 em um ciclo. Neste trabalho adotou-se o pior caso, ou seja, o maior valor (0,001), pois desta forma a estimativa encontrada estará representando a influência máxima deste erro.

2.1.1.2.4 Efeitos da refração atmosférica

Devido a refração atmosférica, a velocidade das ondas eletromagnéticas na atmosférica não é igual ao valor ideal que seria obtido no vácuo. Adicionalmente, os caminhos seguidos por ondas eletromagnéticas na atmosfera não são linhas retas (KUANG, 1996).

A refração atmosférica é responsável por introduzir erros no comprimento de onda devido ao índice de refração real (n) no tempo de medição, que difere do índice de refração de referência (n_{ref}) que é estipulado pelo fabricante do instrumento e, caso não seja corrigido, pode gerar um erro de escala sistemática na medida de distância.

2.1.1.2.5 Acurácia estimada de medidas lineares

Segundo Kuang (1996), considerando que o efeito de diferentes fontes de erros são estatisticamente independentes, a variância na medida de distâncias é calculada por:

$$\sigma_s^2 = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \sigma_{\Delta\Phi}^2 + \sigma_z^2 + \sigma_{ci}^2 + \frac{\sigma_n^2}{n^2} s^2 \quad (12)$$

onde, $\sigma_{\Delta\Phi}$, σ_z , σ_{ci} e σ_n e são o erro padrão na determinação de diferença de fase ($\Delta\Phi$), o erro zero (Z_0), o erro cíclico e o erro do índice de refração (n), respectivamente.

Com as observações anteriores, à respeito do erro zero (σ_z) e do erro cíclico (σ_{ci}), a equação é dada por:

$$\sigma_s^2 = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \sigma_{\Delta\Phi}^2 + \frac{\sigma_n^2}{n^2} s^2 \quad (13)$$

Assim, a variância na determinação do índice de refração é calculada por:

$$\sigma_n^2 = (n_g - 1)^2 \left\{ \left[\frac{273,16}{(273,16 + t)1013,25} \right]^2 \sigma_p^2 + \left[\frac{273,16p}{(273,16 + t)^2 1013,25} \right]^2 \sigma_t^2 \right\} \quad (14)$$

onde, σ_p e σ_t são o erro padrão na determinação da pressão e temperatura, respectivamente. Em instrumentos eletro-ópticos, os efeitos da pressão do vapor de água podem ser desconsiderados.

2.1.2 Acurácia de observações à posteriori

Após o ajustamento pode-se estimar o valor de $\hat{\sigma}_0^2$ em função dos resíduos. A esse valor escalar denomina-se variância da unidade de peso “a posteriori” (sigma zero “a posteriori”). Segundo Gemael (1994), como as observações não são correlacionadas e de mesma confiança, resta estimar o seu grau de precisão, para tanto, precisa-se de uma estimativa da precisão das observações ajustadas. Ainda segundo Gemael (1994), quando em sua aplicações, o geodesta substitui as observações reais pela média aritmética, a variância, neste caso, será o erro médio quadrático dessa média. Assim, o valor da variância “a posteriori” pode ser estimado pela seguinte equação:

$$\hat{\sigma}_0^2 = (V^T * P * V) / n(n - 1) \quad (15)$$

onde: n , V e P são o número de observações, o vetor dos resíduos das observações e o vetor peso das observações, respectivamente.

Neste trabalho, as coordenadas cartesianas locais e suas respectivas estimativas com base nos dados de ângulo e distância (coordenadas polares)

foram obtidas, juntamente com as variâncias *a priori* calculadas para cada observação. Para o ajustamento o método combinado (combina observações e parâmetros) foi utilizado.

3. DESLOCAMENTO SIMULADO

Um campo de calibração para câmaras fotogramétricas, localizado no terraço da Central de Laboratórios do Departamento de Cartografia na FCT/UNESP em Presidente Prudente, foi o espaço utilizado para a coleta de dados. Uma das placas deste campo de calibração serviu de fonte de simulação para o deslocamento considerado. Na Figura 1 a ideia do campo de calibração e os equipamentos dispostos, na Figura 2 a ideia do sistema de coordenadas local em função da localização da estação de origem, do alvo de referência (eixo das ordenadas, y), além dos alvos de interesse.



Fig. 1 - Disposição dos equipamentos no campo de calibração.



Fig. 2 - Estação Total, alvo de referência e alvos de observação.

Neste experimento, três placas no chão de um campo de calibração para câmaras fotogramétricas foram escolhidas para simular um deslocamento. Um ponto na placa 260 e outro na placa 660, origem e referência respectivamente, determinaram o sistema de coordenadas local conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2. Três pontos

na placa 220 (P1, P2 e P3) foram observados na época 1 em duas séries de leitura, com mudança somente do ponto “P2” para observações na época 2 em mais duas séries (P1, P2a e P3), conforme mostra a Figura 6b. A Norma do IBGE para levantamentos geodésicos, alta precisão, (Resolução PR nº 22, de 21-07-83) foi a referência para a realizar o número de séries, intervalo de tempo entre uma série e outra, tolerância na discrepância entre uma medida e a média delas, número de posições por série são exemplos do que foi obedecido para a coleta de dados.

3.1 ETR

O equipamento usado para a coleta de dados foi uma Estação Total Robótica (ETR) da marca *Topcon*, modelo *IS (Image Station) 203* que conforme seu manual, *Topcon Corporation* (2009), apresenta desvio padrão angular de 3” (três segundos de arco) e linear de $2\text{mm} \pm 2\text{ppm} \cdot D$ (dois milímetros mais ou menos duas partes por milhão multiplicada pela distância). A Figura 3 mostra o equipamento.



Fig. 3 - Estação Total Robótica Topcon IS 203. Fonte: o autor

Na sequência realizaram-se os cálculos para variância *a priori* de ângulo e distância horizontais pelas Equações 9 e 13, respectivamente, para cada observação dos três pontos em estudo.

Os valores dos elementos para os cálculos da variância *a priori* foram:

- $\sigma_p = 2''$ (manual do equipamento);
- $\sigma_r = 2,5''$ (Equação 2);
- $\sigma_v = 6''$ (Equação 3);
- $\sigma_c = 0,5 \text{ mm}$ (prumo óptico – Tabela 1);
- $\lambda = 690 \text{ nm}$ (especificação fabricante);
- $\sigma_\phi = 0,001$ (utilizou-se o maior valor);
- $\sigma_z = 0$ (desconsiderado);
- $\sigma_{ci} = 0$ (desconsiderado);
- $\sigma_n =$ (Equação 14);
- $n =$ (Equação 4).

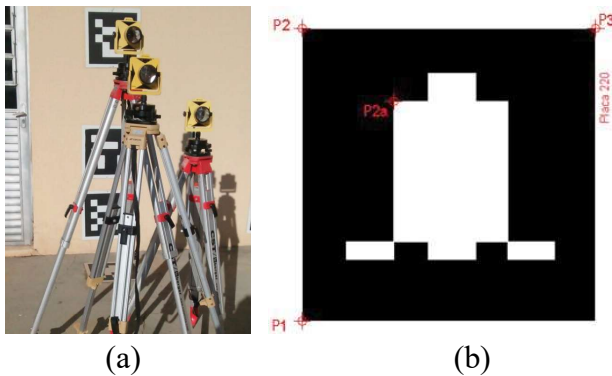


Fig. 4 - (a) alvos e placa para simulação; (b) placa e simulação de deslocamento de um ponto. Fonte: o autor.

A Tabela 2 traz os resultados para as coordenadas e suas estimativas obtidas para as observações com a ETR.

Tabela 2: Coordenadas e precisões dos pontos para cada época

Coordenadas e precisões				
Época 1				
Ptos	X (m)	σ_x (mm)	Y (m)	σ_y (mm)
P1	5,59805	0,065	0,40815	0,705
P2	5,95075	0,063	0,4101	0,707
P3	5,9473	0,060	0,06165	1,078
Época 2				
Ptos	X (m)	σ_x (mm)	Y (m)	σ_y (mm)
P1	5,5981	0,001	0,4081	0,008
P2a	5,8516	0,001	0,31225	0,008
P3	5,94775	0,118	0,0618	2,127

3.2 Equipamentos de referência

Foram feitas também coletas de dados com equipamentos que serviram como referência, tanto na grandeza angular como na linear.

3.2.1 Teodolito e Estação

Para a referência angular foi utilizado o teodolito *Wild T3* com desvio padrão angular de 0,2" (dois décimos de segundo de arco) mais de dez vezes melhor que a ETR em uso, e para a referência linear a estação total *Cygnus 2LS* com precisão linear de 2mm ± 2ppm (dois milímetros mais duas partes por milhão multiplicado pela distância), ou seja, semelhante à ETR. Estes equipamentos são o que de melhor há no LATOGEO (laboratório de topografia e geodésia) da FCT/UNESP para

tais fins, e por isso foram utilizados. A Figura 5 mostra os equipamentos citados (a e b).

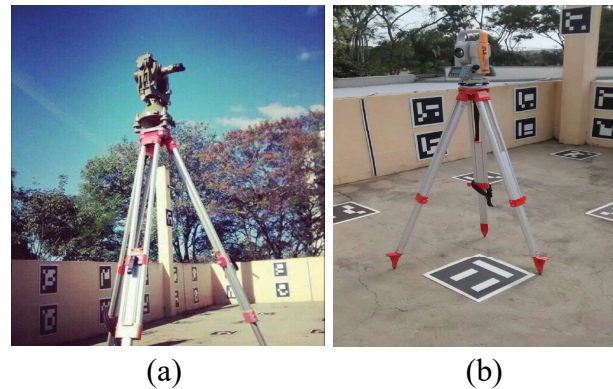


Fig. 5 - (a) Teodolito Wild T3; (b) Estação Total Cignus 2LS. Fonte: o autor

Medida única e na posição direta (PD) foi executada tanto com o teodolito quanto com a estação total, sendo portanto o desvio padrão das coordenadas obtidas nulo. Consequentemente não é possível calcular a incerteza do deslocamento obtido por estes equipamentos. Isso porque o intuito aqui é ter um simples parâmetro para os dados adquiridos pela ETR e modelados conforme proposta aqui apresentada, e não validar ou comparar instrumentos de coleta.

3.2.2 Paquímetro

Também foi tirada medida entre os pontos na placa utilizando um paquímetro. A Figura 6 (a e b) ilustra os equipamentos e o deslocamento do ponto em estudo (P2-P2a).

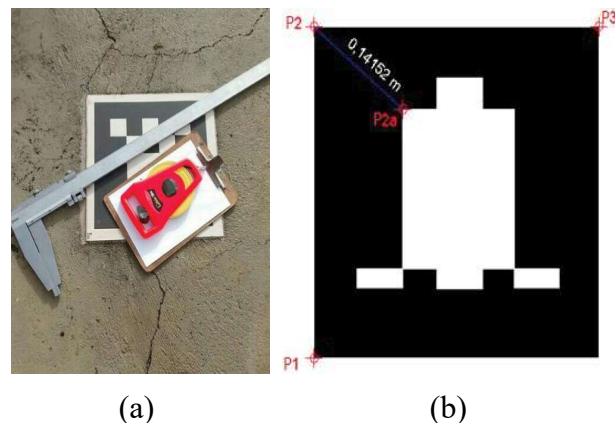


Fig. 6 - (a) Paquímetro para medida na placa; (b) Medida do deslocamento simulado. Fonte: o autor.

Conforme especificação do fabricante do paquímetro utilizado para as medidas na placa a incerteza da medida é de 0,04 mm.

A Tabela 3 traz as coordenadas calculadas em função das observações realizadas com os equipamentos considerados como referência.

Tabela 3: Dados obtidos pelos equipamentos considerados de referência

Ptos	Coordenadas		Paquímetro	
	X (m)	Y (m)	Ptos	distâncias (m)
P1	5,5981	0,4082	P2-P1	0,35142
P2	5,9508	0,4107	P2-P3	0,34888
P3	5,9487	0,0612	P2-P2a	0,14152
P2a	5,8516	0,3132		

A Tabela 4 apresenta os deslocamentos obtidos por cada aparelho (ETR, estação e teodolito, paquímetro) e as incertezas para os pontos (P2-P2a) que foi simulado tal condição, exceto para as observações feitas com o estação e teodolito, pois não houve superabundância de informações.

Tabela 4: Deslocamento e incertezas para o ponto da simulação

Egts	Deslocamento (mm)	Incerteza (mm)
ETR	139,3	0,38
Estação/teodolito	139,1	-----
Paquímetro	141,5	0,04

3.3 Análises

Neste experimento verificou-se, por observações realizadas com a ETR, o deslocamento do ponto proposto (P2) conforme se quis demonstrar. A simulação, que manteve os pontos P1 e P3 fixos e deslocou o P2 entre uma época 1 e 2, apresentou deslocamento, conforme a Tabela 4, de 139,3 mm com uma incerteza de 0,38 mm.

Se comparar com o deslocamento obtido pelos equipamentos considerados como referência (teodolito e estação total) tem-se discrepância de 0,2 mm, pois o deslocamento em P2 (P2-P2a) foi de 139,1 mm, ou seja resultado muito próximo do obtido com a ETR.

Se fizer ainda uma comparação do resultado da ETR com a medida feita com o paquímetro para os pontos em P2-P2a a discrepância foi de 2,2 milímetros com incerteza de 0,39 mm, após ser feita a propagação de erros. No caso

em estudo, esse valor representa uma diferença de aproximadamente 1,5% do deslocamento encontrado. Em um caso real vai depender da tolerância da estrutura em sofrer forças que desloque essa diferença de grandeza.

Em uma última análise é importante observar a precisão das coordenadas de um ponto investigado, pois obviamente ela deve ser menor que a ordem de grandeza do deslocamento estudado. Neste ensaio controlado o desvio padrão, conforme observa-se na Tabela 2, apresenta-se na ordem do décimo do milímetro comparado ao deslocamento na ordem dos centímetros.

Importante ressaltar, ainda, que nesse experimento o material das placas que foram utilizadas para simular o deslocamento mereceria também ser estudado, pois esse material pode ter um coeficiente de dilatação que consideravelmente influencie no deslocamento dos pontos observados. Neste trabalho o enfoque foi o tratamento das observações, mas à título de sugestão há de se considerar o objeto de estudo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o trabalho realizado percebe-se que cada fonte de erro deve ser considerado no processo de análise da acurácia, caso contrário ao encontrar discrepâncias nas observações de duas épocas, será difícil determinar se esta variação é unicamente uma movimentação ou se os erros inerentes ao processo de medição está potencializando essa movimentação, prejudicando a análise de deslocamento. Neste trabalho algumas fontes foram desconsideradas, o que não prejudica a análise, pois as considerações devem ser feitas caso a caso. A proposta de Kuang (1996) traz equações que modelam os erros e que podem ser aplicadas diretamente nas observações vindas do campo (dados brutos), no entanto o mesmo autor considera, como nessa pesquisa, as estimativas desses efeitos.

Obter a variância *a priori* das observações conforme considera Kuang (1996) proporciona diferença na obtenção da matriz peso das observações em relação a matriz peso convencionalmente considerada como a matriz identidade. Por consequência os valores da variância *a posteriori* (consequente desvio padrão) são valores mais apurados, que representam mais fielmente a dispersão da medida. Alguns testes foram realizados por

Ferreira, Mendonça e Chaves (2014) comparando resultados nestas condições.

O deslocamento simulado foi detectado pela ETR com diferença na ordem do décimo do milímetro em relação aos equipamentos que foram considerados como referência, e na ordem do milímetro para um deslocamento na dezena do centímetro. O tratamento das observações mostrou ser eficaz quando comparado às observações com equipamentos considerados de referência, pois os resultados com o tratamento proposto foram muito próximos aos dados dos instrumentos de igual ou melhor precisão que a ETR. Fica como recomendação analisar a capacidade de dilatação do material em que o alvo estiver afixado ou posicionado que é fonte de observação e assim conhecer o impacto desse fenômeno na medida final.

Importante enfatizar que a essência desta pesquisa pode ser considerada não só para este equipamento, mas para qualquer equipamento em qualquer trabalho que se busque acurácia das observações.

Vale lembrar também que o intuito aqui é chamar a atenção do mensurador para levar em consideração incertezas do seu instrumento de medida e buscar modelá-las para minimizar o quanto possível erros dessa fonte.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Cartografia por disponibilizar o local e os equipamentos para a realização do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHRZANOWSKI, A. **Design and error analysis of surveying projects**. University of New Brunswick, 1977. 105 p.

CRUZ, W.D; FAGGION, P.L; VEIGA, L.A.K. Determinação das componentes do erro cíclico em estações totais laser, utilizando interferômetro como padrão metrológico. **Revista Brasileira de Cartografia** nº 63 Edição Especial Geodésia e Topografia, p. 527-532, 2011.

FERREIRA, N. R. A; MENDONÇA, C. H. C;

CHAVES, J. C. Acurácia de observações de uma estação robótica para fins de monitoramento de estruturas. **Congresso Brasileiro de Cartografia, Gramado**, 2014. 11 p.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba. Ed. UFPR, 1994. 319 p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos**. Resolução PR nº 22, de 21-07-83.

KUANG, S. **Geodetic Network Analysis and Optimal Design: Concepts and Applications**, Ann Arbor Press, Inc., Chelsea, Michigan, 1996. 368p.

MOSCHAS, F.; STIROS, S. Measurement of the Dynamic Displacements and of the Modal Frequencies of a Short-Span Pedestrian Bridge Using GPS and an accelerometer **Journal Homepage Engineering Structures**, 2011, 33, p 10-17.

NEVES, R. V. (Org.) et al. Avaliação da aplicação de técnicas geodésicas no monitoramento de estruturas civis **Revista Brasileira de Geomática**, v.2, n.2, p. 67-75, 2014.

PSIMOULIS, P.; STIROS, S. Measuring Deflections of a Short-Span Railway Bridge Using a Robotic Total Station **Journal of Bridge Engineering**, 2013, 18, p. 182-185.

PSIMOULIS, P.; STIROS, S. Measurement of deflections and of oscillation frequencies of engineering structures using Robotic Theodolites (RTS) **Journal Homepage Engineering Structures**, 2007, 29, p. 3312-3324.

RÜEGGER, J.M. Recent developments in electronic distance measurement. **Aust Surv** 30:p. 170-177, 1980.

TETENS, O. **Über cinige meterorologische Begriffe**. Z. Geophys., n.6, p. 297-309, 1930.

TOPCON Instruction manual Imaging Station: IS Series, Topcon Corporation, 2009.