

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS ESPACIAIS COMO O USO DE ESTAÇÕES TOTAIS ROBÓTICAS PARA MONITORAMENTO GEODÉSICO DE ESTRUTURAS

D. O. Martins¹, I. Silva²

^{1,2}Universidade de São Paulo, Brasil

Comissão II - Geodésia, Astronomia, Topografia e Agrimensura

RESUMO

O monitoramento de estruturas a partir de métodos geodésicos já é uma prática comum nos meios técnico e científico. No entanto, com o advento das estações totais robóticas, o método da irradiação tridimensional aliado à automatização dos instrumentos de medição, passou a ser uma opção viável e tem proporcionado bons resultados. Em geral, a aplicação dessa técnica se baseia na observação de pontos da estrutura a partir de uma única estação de monitoramento, conhecido por método polar. Um método simples de ser aplicado, porém, pouco consistente. Por esta razão, as pesquisas científicas atuais sobre esse tema têm se concentrado no desenvolvimento de modelos matemáticos e técnicas baseadas no uso de redes geodésicas de referência e medições multipolares, em que os ângulos e as distâncias são observados concomitantemente a partir de vários pilares. Tem-se assim, um modelo com redundância de observações e, portanto, mais robusto. Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo apresentar e discutir métodos de determinação de coordenadas espaciais com e sem medição de distância, por meio de modelos multipolares.

Palavras chave: Estações Totais Robóticas, Monitoramento Geodésico de Estruturas, Métodos Multipolares.

ABSTRACT

The structural monitoring is based on the geodetic methods and this practice is usual in the technical and scientific community. The use of the three-dimensional topographic measurement method by means of a robotic total station has become a viable option with good results in practical applications. In general, this technique is based on the observation of a specific point in the structure carried out by a single monitoring station, also known as polar method. However, the polar method is seen as a simple and inconsistent method. By this reason, researches have focused in the development of mathematic modeling and techniques that use reference geodetic network and multipolar measurements. In the multipolar measurements the angles and distances are observed concomitantly through several monitoring stations, resulting in a model with redundancy of observations and then more robust. In this context, this paper has the objective to present and discuss methods which is used to determine spatial coordinates with and without distance measurement, based on the multipolar models.

Keywords: Robotic Total Stations, Geodetic Structural Monitoring, Multipolar Methods.

1- INTRODUÇÃO

Monitorar significa acompanhar o desempenho de algum evento com o objetivo de avaliar alterações de comportamento. À ação de monitorar dá-se o nome de monitoramento ou monitoração. E o monitoramento de estruturas é um processo de medição sistemática da deformação ou deslocamento de objetos submetidos a ações de carga, com o objetivo de controlar o movimento de pontos, desse objeto, para assegurar-se de que eles estão compatíveis com padrões de comportamentos estruturais predefinidos (US Army Corps of Engineers, 2002).

É fato que qualquer objeto, natural ou artificial, está sujeito a variações, em sua dimensão, forma e posição, no espaço e no tempo. Por estas razões, toda estrutura física, que possa apresentar riscos, deve ser supervisionada durante toda sua existência, para permitir a detecção precoce de possíveis colapsos.

Com os avanços tecnológicos das últimas décadas, tornou-se possível automatizar o processo de monitoramento geodésico de estruturas. Essa tecnologia permite que o monitoramento seja feito de maneira contínua sem a interferência do operador, o

que aumenta sensivelmente a qualidade dos resultados (Lienhart et al., 2017).

Para servir a essas finalidades é necessário utilizar equipamentos denominados estações totais robóticas, as quais são dotadas de servomecanismos e rotinas de reconhecimento automático de prismas, além de possuírem recursos para o desenvolvimento de programas aplicativos de gerenciamento do equipamento. Dessa forma, as técnicas devem se basear nas medições de ângulos e distâncias, entre os equipamentos e os pontos a serem monitorados.

Em geral, devido à facilidade de aplicação e de tratamento dos dados, as técnicas de monitoramento geodésico com o uso de estações totais, empregam o método polar, em que cada ponto é observado individualmente a partir de uma única estação de monitoramento. Trata-se, evidentemente, de um método de medição simples de ser aplicado, mas que não permite nenhuma detecção de erros grosseiros ou sistemáticos e tão pouco a avaliação da confiabilidade dos resultados obtidos.

Por esta razão, as pesquisas científicas sobre esse tema, a exemplo de (El-Din, 2014) e (Bersh, 2015), tem se concentrado no desenvolvimento de técnicas baseadas no uso de redes de estações de referência, em que os ângulos e as distâncias, relativas aos pontos de monitoramento, são observadas concomitantemente a partir de vários pilares. Neste caso, devido a existência de redundância de observações, as coordenadas espaciais dos pontos de monitoramento são determinadas a partir do emprego de métodos de ajustamento de observações, que permitem avaliar as precisões e a confiabilidade dos resultados. Entretanto, é um método de medição que exige maior conhecimento técnico para a configuração da rede e para o tratamento posterior dos dados.

Considerando o exposto acima, este trabalho tem como objetivo geral a apresentação e discussão dos métodos de monitoramento geodésico de estruturas disponíveis atualmente e, como objetivo principal, a apresentação de modelos matemáticos multipolares para a determinação de coordenadas espaciais de pontos observados a partir de uma rede de estações de referência. Os modelos apresentados foram validados por meio de campanhas em séries de medições de campo, como mostram os resultados.

2- MÉTODOS MULTIPOLARES

Os métodos de determinação de coordenadas espaciais multipolares podem ser categorizados em (i) métodos multipolares com medição de distâncias e (ii) e sem medição de distâncias. Essa categorização ocorre devido ao fato de haver casos em que não é possível instalar um prisma refletor sobre o ponto em que se deseja determinar as coordenadas. Nestes casos, as determinações são feitas somente em função de medições angulares. Na maioria dos casos, entretanto,

principalmente para o monitoramento de estruturas, é possível instalar um prisma refletor no ponto de medição. As determinações das coordenadas espaciais, nestes casos, são feitas em função de medições de ângulos e distâncias.

Outra situação recorrente destes métodos é a determinação das coordenadas espaciais com superabundância de medições, ou seja, maior número de visadas entre as estações de coordenadas conhecidas e o alvo, do que as estritamente necessárias para a determinação das coordenadas do ponto. A solução, nestes casos, é obtida por intermédio da aplicação do método dos mínimos quadrados, conforme (Ghilani, 2017), para ajustamento das observações na forma paramétrica.

O primeiro a ser apresentado é o método das distâncias mínimas, que considera a situação geométrica do problema da interseção espacial sem medição de distâncias, conforme indicado na Figura 1. Trata-se de uma metodologia de medição e de cálculos matemáticos baseados na minimização do somatório das distâncias entre os supostos pontos de interseção de cada visada e o ponto a ser ajustado. A metodologia de medição e os cálculos matemáticos envolvidos no processo foram apresentados por (Moreira, 1998) com estações totais mecânicas e por (Martins, 2013) com estações totais robóticas.

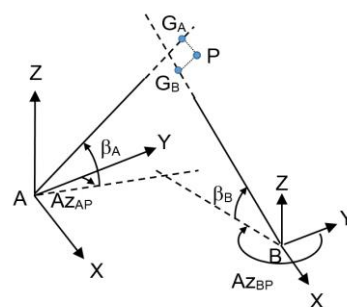


Fig. 1 – Geometria das distâncias mínimas

O método considera que, quando o somatório das distâncias do ponto P às retas definidas pelas visadas for mínimo, se obtém a melhor coordenada para o ponto. Desta forma, para que a minimização seja possível, é necessário, primeiramente, estabelecer as equações das retas definidas pelas linhas de visadas de cada instrumento dirigido ao alvo P.

A direção de cada reta é dada pelo vetor v_i , definido em função dos seus cossenos diretores, baseados nos azimutes e nos ângulos verticais observados. Assim, os parâmetros do vetor são definidos pelas equações (1), (2) e (3):

$$a_i = \cos \beta_i \cdot \sin Az_i \quad (1)$$

$$b_i = \cos \beta_i \cdot \cos Az_i \quad (2)$$

$$c_i = \sin \beta_i \quad (3)$$

A reta genérica r_i tem como origem o centro óptico CO_i de cada instrumento, a direção do versor v_i , e o parâmetro da reta genérica t_i . Os pontos sobre as retas genéricas r_i , onde uma perpendicular com origem no alvo P intercepta a referida reta, são denominados, genericamente, de $G_i(t_i)$:

$$G_i = CO_i + t_i \cdot (a, b, c)_i \quad (4)$$

A condição de ajustamento é que o somatório de todas as distâncias seja mínimo, ou seja, a função indicada pela equação (5) deve ser minimizada para obter as coordenadas ajustadas do ponto P.

$$\sum d_i'^2 = \sum [(X, Y, Z)_P - G_i]^2 \quad (5)$$

Para a minimização do somatório das distâncias é necessário calcular as derivadas parciais da função, onde F é o somatório das distâncias.

$$F = F(X_P, Y_P, Z_P, t_1, t_2, \dots, t_n) \quad (6)$$

Derivando a equação (6) em função das incógnitas ($\partial F / \partial X_P$, $\partial F / \partial Y_P$, $\partial F / \partial Z_P$, $\partial F / \partial t_1$, $\partial F / \partial t_2, \dots$, $\partial F / \partial t_n$), soluciona-se o problema de acordo com a equação (7).

$$M_{INC} = (M_{COEF})^{-1} \cdot M_{IND} \quad (7)$$

Para cada visada têm-se três equações de erros. O número de incógnitas é igual a $3+n$, que são as três coordenadas do ponto P e a distância das retas inclinada r_i de cada visada. O problema tem solução desde que $n > u$. Assim, necessita-se de pelo menos duas visadas para que o problema tenha solução, ou seja, 6 equações e 5 incógnitas.

O segundo método multipolar, apresentado a seguir, se utiliza das medições de distâncias. Trata-se de outra solução para determinação de coordenadas espaciais com excesso de visadas, denominado método da minimização dos resíduos das funções trigonométricas, o qual pode ser desenvolvido de duas formas, classificados como caso 1 e 2.

No caso 1, o modelo matemático se baseia na determinação dos erros de posicionamento cometidos nas medições dos azimutes Az_i , dos ângulos verticais β_i e das distâncias d'_i efetuadas em cada visada ao ponto P, como pode ser visto na Figura 2.

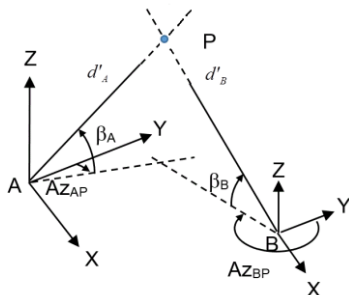


Fig. 2 – Geometria das minimizações ‘Caso 1’

Onde se aplica diretamente as funções trigonométricas entre os valores medidos e as incógnitas do problema. Tem-se assim:

$$Az_i = a \tan(\Delta X / \Delta Y) \quad (8)$$

$$\beta_i = a \tan(\Delta Z / \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}) \quad (9)$$

$$d'_i = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} \quad (10)$$

As equações de erros geradas pelas equações acima são respectivamente iguais a:

$$\sum \frac{\partial Az_i}{\partial X_P} \delta X_P, \frac{\partial Az_i}{\partial Y_P} \delta Y_P, (f_0 - Az_i) \quad (11)$$

$$\sum \frac{\partial \beta_i}{\partial X_P} \delta X_P, \frac{\partial \beta_i}{\partial Y_P} \delta Y_P, \frac{\partial \beta_i}{\partial Z_P} \delta Z_P, (f_0 - \beta_i) \quad (12)$$

$$\sum \frac{\partial d'_i}{\partial X_P} \delta X_P, \frac{\partial d'_i}{\partial Y_P} \delta Y_P, \frac{\partial d'_i}{\partial Z_P} \delta Z_P, (f_0 - d'_{0i}) \quad (13)$$

No caso 2, entretanto, se considera a distância entre as estações de medição. Para incluir essa grandeza no método, recomenda-se substituir a equação (8), pela equação (14), apresentada na sequência. O azimuth, neste caso, é substituído pelo ângulo horizontal horário interno do triângulo formado em cada interseção, conforme indicado na Figura 3.

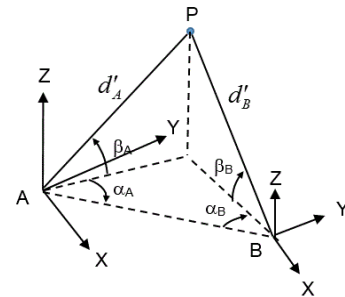


Fig. 3 – Geometria das minimizações ‘Caso 2’

As experiências mostraram que, nestas condições, o modelo se torna sensível à imprecisão na medição das distâncias entre as estações de medição. O modelo matemático, para este caso, compõe-se das equações indicadas a seguir:

$$\alpha_i = a \cos \frac{\sum (\Delta X^2 \Delta Y^2 AB^2) - \Delta X^2 - \Delta Y^2}{2 \cdot AB \cdot \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}} \quad (14)$$

As equações de erros para as duas últimas equações acima são as mesmas do exemplo anterior. Por esta razão, apresenta-se a seguir apenas a equação de erros para a primeira equação de observação.

$$\sum \frac{\partial \alpha_i}{\partial X_P} \delta X_P, \frac{\partial \alpha_i}{\partial Y_P} \delta Y_P, (f_0 - \alpha_i) \quad (15)$$

Nestas condições, considerando o caso de duas visadas partindo das estações A e B, para ambos os casos, tem-se, o vetor dos resíduos $V=AX-L$, a matriz das incógnitas $X=(A^T PA)^{-1}(A^T PL)$ e suas respectivas precisões $\sigma^2=V^T PV/gl$.

3- APLICAÇÃO PRÁTICA DO MÉTODO

A aplicação prática consistiu em realizar medições de campo para a determinação das coordenadas espaciais de um alvo, que foi deslocado no espaço com movimentos conhecidos. A partir das coordenadas determinadas, foi calculado o deslocamento do ponto e verificada a acurácia de cada método, a partir da comparação dos deslocamentos calculados com os deslocamentos conhecidos.

O ensaio de medição do ponto deslocado também foi realizado a partir da medição polar múltipla com dois pontos de referência visando um ponto no espaço, conforme indicado na Figura 4. Em cada ponto de referência foi posicionado uma estação total robótica e as visadas foram realizadas automaticamente, sem interferência do operador, por intermédio de rotinas de medição incluídas nos instrumentos. Por se tratar da medição de pontos no espaço com intervalos de tempo relativamente longos entre as medições, optou-se pelo estabelecimento de três pontos de controle para o posicionamento dos pontos de referência antes de cada etapa de medição do ponto no espaço. Para isso, foi estabelecida uma rede geodésica de pontos de referência posicionada no instante t_0 . As estações de referência, foram denominadas Estação A e Estação B e o ponto de monitoramento foi denominado GPRC.

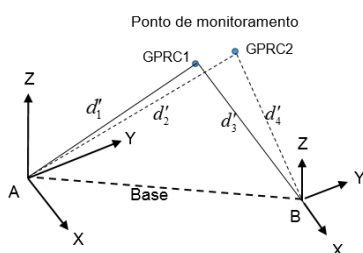


Fig. 4 – Medição do ponto deslocado

Os pontos de referência foram monumentalizados por intermédio de dois tripés industriais e os pontos de controle foram monumentalizados em bases fixas. O ponto de monitoramento GPRC foi posicionado sobre uma estrutura metálica. Para o movimento controlado do prisma de medição foi construído um suporte que permite realizar variações milimétricas no posicionamento do prisma.

Antes do início de cada série de medições, primeiramente verificou-se a estabilidade da Base A, ocupada por uma estação total robótica modelo Leica (TCRA 1201+) e da Base B ocupada por outro modelo Leica (TCA1201+), em relação aos pontos de

referência 1, 2 e 3. As coordenadas calculadas para cada estação de referência foram posteriormente utilizadas nos cálculos do deslocamento do alvo.

As medições automáticas ao alvo foram realizadas por intermédio de um programa interno incluído em cada estação total denominado *monitoring*. As séries de medições foram realizadas a cada cinco minutos, com intervalo de um minuto para o monitoramento de cada posição do alvo. Desta maneira, obtiveram-se cinco séries de leituras, sendo que em cada série mediu-se os três pontos de controle e de referência, pelo método da recessão, para verificação da estabilidade da rede de pontos, e em seguida, mediu-se a posição do alvo.

Os movimentos do alvo foram em sequências de 1 mm, 5 mm, 10 mm e 20 mm. A posição inicial do alvo foi denominada GPRC00. A posição deslocada de 1 mm, em relação ao alvo GPRC00, foi denominada GPRC01. A posição deslocada de 5 mm, em relação ao alvo GPRC00, foi denominada GPRC05. A posição deslocada de 10 mm, em relação ao alvo GPRC00, foi denominada GPRC10 e a posição deslocada de 20 mm, em relação ao alvo GPRC00, foi denominada GPRC20. As Tabelas 1 e 2 mostram as coordenadas das estações de referência A e B e suas precisões nos instantes t_0 de cada série de medição dos alvos GPRC.

TABELA 1 – ESTAÇÃO (A) t_0

A	X (m)	Y (m)	Z (m)	$\sigma_{XYZ}(mm)$
GPRC00	1000,0044	4999,9975	100,0000	1,2
GPRC01	1000,0042	4999,9975	100,0000	1,3
GPRC05	1000,0046	4999,9977	99,9997	0,8
GPRC10	1000,0047	4999,9976	99,9997	0,7
GPRC20	1000,0047	4999,9975	99,9997	0,8

TABELA 2 – ESTAÇÃO (B) t_0

B	X (m)	Y (m)	Z (m)	$\sigma_{XYZ}(mm)$
GPRC00	1013,1146	5000,7533	99,9462	0,9
GPRC01	1013,1144	5000,7532	99,9461	1,1
GPRC05	1013,1142	5000,7533	99,9461	0,6
GPRC10	1013,1139	5000,7533	99,9461	0,7
GPRC20	1013,1147	5000,7534	99,9461	0,7

As Tabelas 3 e 4 mostram as medições a partir das estações de referência A e B nos instantes t_0 de cada série de medição dos alvos GPRC.

TABELA 3 – MEDIÇÕES A PARTIR DE (A) t_0

A	Az(dec)	B (dec)	d'inc (m)
GPRC00	15,580047	5,569830	23,6692
GPRC01	15,583430	5,566883	23,6697
GPRC05	15,589300	5,557280	23,6701
GPRC10	15,599710	5,544290	23,6718
GPRC20	15,621867	5,519671	23,6739

TABELA 4 – MEDIÇÕES A PARTIR DE (B) t_0

A	Az(dec)	B (dec)	d'inc (m)
GPRC00	342,817491	5,845978	23,0808
GPRC01	342,821518	5,843072	23,0807
GPRC05	342,828919	5,833599	23,0793
GPRC10	342,842218	5,821191	23,0782
GPRC20	342,863683	5,797399	23,0748

4- RESULTADOS

Devido ao fato de existir variadas combinações para verificação dos deslocamentos dos pontos, foi sorteado e escolhido de forma aleatória duas variantes dentro deste universo de combinações. Assim, os resultados obtidos com o desenvolvimento e a realização de cada método, além de suas respectivas precisões e acurácias seguem nas Tabela 5 e 6.

TABELA 5 – GPRC00 E GPRC10 (10 mm)

Método	Δ_{xy} (mm)	Δ_z (mm)	σ_{xyz} (mm)	Ac_{xyz} (mm)
Polar	9,166	10,550	1,024	0,999
Dist Mín	9,305	10,393	0,018	0,799
Caso 1	9,380	10,391	0,001	0,733
Caso 2	9,377	10,371	0,014	0,725

TABELA 6 – GPRC05 E GPRC20 (15 mm)

Método	Δ_{xy} (mm)	Δ_z (mm)	σ_{xyz} (mm)	Ac_{xyz} (mm)
Polar	14,477	15,099	1,025	0,533
Dist Mín	14,670	14,982	0,050	0,331
Caso 1	14,787	14,979	0,004	0,214
Caso 2	14,795	14,961	0,016	0,209

5- CONCLUSÕES

Deve-se enfatizar que o monitoramento geodésico de estruturas pode ser considerado como um

sistema de medição seguro e eficiente para o controle de deformações e deslocamentos de estruturas naturais e artificiais. As técnicas de medições, os instrumentos e os métodos de tratamento dos dados disponíveis, atualmente, garantem qualidade, economia e rapidez em qualquer tipo de monitoramento geodésico.

O uso de estações totais robóticas é uma solução altamente confiável, segura e econômica, principalmente se as medições forem realizadas em modo contínuo e sem interferência do operador.

Outro fator importante a ressaltar é a influência dos pesos, que podem interferir diretamente nos resultados. Também se observa, que os valores das precisões e das acurácias estão indicados com excesso de algarismos significativos para realçar a diferença dos valores calculados.

Para os métodos de determinação de coordenadas espaciais, os testes realizados demonstram que as medições com o uso do método polar é uma solução adequada para a maioria dos projetos, a inconveniência do método é sua inconsistência, pois, se mostram suscetíveis aos erros de medições. Por esta razão e também por não dispor de matemática de convergência por interseções, recomenda-se para monitoramento, sempre que possível, o uso de métodos de multipolares.

Nota-se que os métodos multipolares, primeiramente sem medição de distância, a exemplo do exposto, que minimiza as distâncias entre o alvo e os versores das linhas de visadas, produzem excelentes resultados. Porém os métodos multipolares com medição de distância se mostram com maior qualidade. Isso se deve ao fato de inserir mais observações, e assim oferecer maior redundância aos dados, deixando-os menos suscetíveis aos erros de medições e com maior poder de controle e ajuste, que consequentemente, proporciona mais confiança sobre as informações adquiridas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bersh, A. A. E., 2015, Structural deformation monitoring and analysis of highway bridge using accurate geodetic techniques, Mansoura University, Mansoura City, Egypt, 488-498 p.
- El-Din, F. H., 2014, Modification of intersection technique in monitoring the engineering structures, Kafr El-Sheikh University, Egypt. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), Vol. 5(12), December, 256-266 p.
- Ghilani, C. D., 2017, Adjustment Computations: Spatial Data Analysis, 6th ed. New York: John Wiley & Sons, 720 p.
- Lienhart, W.; Ehrhart, M.; Grick, M., 2017, High frequent total station measurements for the monitoring of bridge vibrations. Institute of Engineering Geodesy

and Measurement Systems (IGMS), Autria, Journal of Applied Geodesy, Vol. 11(1), 1-8 p.

Martins, D. O., 2013, Determinação de coordenadas espaciais a partir do método das distâncias mínimas, Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 256 p.

Moreira, A. P., 1998, Métodos de cálculo de coordenadas tridimensionais para o controle de obras de engenharia, Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 206 p.

US Army Corps of Engineers, 2002, Structural Deformation Surveying, Department of the Army, Washington, USA, 292 p.