

UMA ABORDAGEM DE MONITORAMENTO GEOESPACIAL DE BARRAGENS HIDROELÉTRICAS A PARTIR DO GNSS: RESULTADOS PRELIMINARES

Haroldo Antonio Marques¹

Admilson da Penha Pacheco²

Elmo Leonardo Xavier Tanajura³

DOI: 10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v26n2p129-146

² Instituto Militar de Engenharia – IME, Seção de Ensino em Eng. Cartográfica, haroldoh2o@gmail.com

¹Programa de Pós-Graduação em Geociências – UFPE, pacheco3p@gmail.com

³ Programa de Pós-Graduação em Geociências – UFPE, elmo.tanajura@ufba.br

RESUMO

Os monitoramentos de barragens hidroelétricas são realizados por métodos geotécnicos e/ou geodésicos. O monitoramento geodésico é comumente realizado a partir de métodos clássicos da Geodésia, os quais fazem uso de Medidor Eletrônico de Distância e/ou Estação Total e Nível de Precisão. Estes métodos permitem obter posição com alta precisão (milímetros) quando observações são realizadas a partir de uma rede geodésica com as devidas aplicações de técnicas geodésicas, como por exemplo, correções atmosféricas, reduções e ajustamento de observações com controle de qualidade. O uso do GNSS para fins de monitoramento e auscultação de barragens hidroelétricas e deformações de estruturas tem sido motivo de diversas investigações nos últimos anos, haja vista este sistema proporcionar posicionamento geodésico com precisão milimétrica e alta resolução temporal. O GNSS atualmente contempla os sistemas GPS (Americano), GLONASS (Russo), Galileo (Europeu), Beidou/Compass (Chinês) e outros. Diversos estudos científicos têm sido realizados visando melhoramentos dos modelos matemáticos e geofísicos para correção dos efeitos atmosféricos que afetam os sinais GNSS, além de melhores estimativas de coordenadas das redes geodésicas com consequentes melhorias dos produtos disponíveis tais como as órbitas dos satélites. Dentro deste contexto, tem-se a aplicação de softwares denominados científicos para o processamento de dados GNSS, os quais diferentemente dos softwares comumente utilizados para fins comerciais, aplicam uma série de correções às medidas e técnicas avançadas de processamento de dados que permitem estimar coordenadas com a máxima capacidade fornecida pelo GNSS em termos de qualidade. Neste contexto, este artigo apresenta uma abordagem metodológica para o monitoramento de barragens a partir de posicionamento GNSS, enfocando de forma complementar um experimento preliminar de monitoramento de Barragem na Usina de Apolônio Sales da CHESF, o qual envolveu a determinação de uma rede geodésica e análises de estimativa posicional a partir dos dados GNSS. Os resultados obtidos mostram que a repetibilidade na componente horizontal é da ordem de milímetros entre as estimativas de cada sessão de coleta de dados GNSS.

Palavras Chaves: Monitoramento de Estruturas; Posicionamento Relativo; GNSS.

ABSTRACT

The monitoring of hydroelectric dams is carried out by geotechnical and/or geodetic methods. The geodetic monitoring is commonly accomplished from classic geodetic methods, which make use of Electronic Meter Distance and / or Total Station and Precision Level. These methods allow obtaining position with high accuracy (mm) when observations are taken from a geodetic network with the appropriate applications of geodetic techniques, such as atmospheric correction, reduction and adjustment of observations with respective quality control. The use of GNSS for monitoring purposes and auscultation of hydroelectric dams and structural deformations has been the issue of several investigations in recent years, considering this system provides geodetic positioning with millimeter accuracy and high temporal resolution. The GNSS currently includes GPS (USA), GLONASS (Russian), Galileo (European), Beidou / Compass (Chinese) and others. Several scientific studies have been conducted aiming to improve the mathematical and geophysical models for the correction of atmospheric effects in the GNSS signals, besides the best estimates of coordinates of geodetic networks with consequent improvements in products as for example satellite orbits. In this context, there are applications of the so called scientific software for the GNSS data processing, which unlike the commonly used commercial software applies a series of corrections to measurements and advanced processing techniques which allow the coordinates estimation with maximum capacity provided by GNSS in terms of quality. In this context, this article presents a methodological approach for monitoring dams with GNSS, focusing complementarily a preliminary experiment of dam monitoring in Plant Apollonius Sales that involved a geodetic network determination with analyses of estimates from GNSS data. The results showed that the repeatability is of the order of millimeters among the estimates of each GNSS data collection session.

Keywords: Dam Monitoring; Relative positioning; GNSS

INTRODUÇÃO

Diversos estudos e pesquisas têm sido realizados nos últimos anos pela comunidade científica em geral visando melhorar a capacidade e qualidade do monitoramento de barragens, principalmente em face à disponibilidade de novas tecnologias capazes de se integrarem aos métodos tradicionais aplicados no monitoramento, os quais envolvem medições por sensores geotécnicos (pêndulos, extensômetros, distanciômetros, etc.) e os métodos clássicos da Geodésia (Medidor Eletrônico de Distância, Nível de Precisão e outros) (Hudnut & Behr, 1998; Fazan, 2010; Radhakrishnan, 2014; Silva *et al.*, 2015). Os métodos geodésicos permitem determinar deslocamentos absolutos de pontos nas

estruturas, enquanto os métodos geotécnicos permitem determinar valores relativos (Chrzanowski, 1992).

Segundo Gusmão Filho (2006), as barragens podem ser classificadas em barragens de concreto e barragens de aterro. As barragens de aterro são construídas de material pouco resistente quando comparadas com as de concreto, sendo comuns as barragens de terra e barragens de enrocamento. Cada um desses tipos de barragens tem características de construção diferentes, solicitações diversas e desempenho distintos. O conceito de Segurança de Barragens pode ser definido como sendo a providência de condições que vise manter a integridade estrutural e operacional da barragem e a

preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente (Brasil, 2010). No tocante a estrutura de uma barragem, a ocorrência de comportamentos estocásticos (ou aleatórios) atípicos pode resultar em consequências indesejáveis a níveis econômicos, ambientais e na segurança de pessoas (Icold, 2003). Por esta razão, o monitoramento ou auscultação de barragens é um tema de fundamental importância para a sociedade em geral. Neste contexto, destaca-se no Brasil a Lei nº 12.334 de setembro de 2010 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, além de criar o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.

O avanço tecnológico com melhoramento dos equipamentos e a disponibilidade de comunicação via internet permitem atualmente o monitoramento em tempo real e de forma automatizada, seja a partir, por exemplo, do uso de Estações Totais robóticas ou de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) ou mesmo a partir da integração de todos os métodos geodésicos e geotécnicos disponíveis. O termo GNSS é usado para designar os sistemas de posicionamento espacial existentes, sejam o GPS, GLONASS, Galileo, Beidou/Compass, entre outros. O GPS e GLONASS são os sistemas operacionais na atualidade e são de responsabilidade dos EUA e Rússia, respectivamente. O GPS foi declarado operacional em 1985 e passa atualmente por um processo de modernização com a disponibilidade de um terceiro sinal civil (portadora L5), no qual se espera qualidade de posicionamento que atenda principalmente à navegação aérea, a qual envolve segurança de vida. O GLONASS também passa por processo de modernização com novos satélites lançados e disponibilidade de novos

sinais com a mesma tecnologia utilizada pelo GPS (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008; Oleynik, 2011). A modernização destes sistemas e outros avanços amplia o espectro para novas pesquisas de caráter científico que em consequência proporcionam melhoramentos da qualidade posicional.

O GNSS apresenta algumas vantagens em relação aos métodos clássicos da Geodésia, como por exemplo, não requer a intervisibilidade entre as estações; o Sistema Geodésico de Referência (SGR) é geocêntrico, com origem fora da área de influência da estrutura; as estimativas podem ser realizadas com frequências de 1 Hz ou maiores; a posição tridimensional do ponto é obtida; a coleta de dados requer menor número de operadores; estimativa com precisão milimétrica é possível, principalmente para linhas de bases curtas ou linhas longas a com adoção de estratégias adequadas (Seeber, 2003; Monico, 2008; Bond, 2007; Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Vários trabalhos e pesquisas foram desenvolvidos com a finalidade de comprovar o potencial da tecnologia de posicionamento por satélites no monitoramento de barragens. No âmbito internacional podem-se citar os trabalhos de Hudnut & Behr (1998); Janssen & Rizos (2003); Kulkarni *et al.* (2004); Jiang-xiang & Hong (2009); Taşccedil (2010) e Liu *et al.* (2014). No Brasil destacam-se as pesquisas de Chaves (2001); Teixeira (2001); Teixeira e Damasceno (2005); Granemann *et al.* (2008); Ribeiro (2008); Suci & Faggion (2012) e Fazan (2010).

Fazan (2010), por exemplo, utilizou dados GNSS na detecção de deslocamentos com aplicação do Teste de Congruência Global (TCG) e Análise Geométrica (AG) mostrando que os dois métodos apresentam boa correlação entre si e indicam possíveis deslocamentos. Shen (2004) realizou

estudos relacionados com os deslocamentos ocorridos na costa leste do Canadá a partir de dados oriundos de estações de monitoramento contínuo. Nesta pesquisa foi utilizado o sistema *Differential Positioning Program* (DIPOP) desenvolvido na Universidade de New Brunswick. As soluções obtidas foram comparadas com as fornecidas pelo *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF). Para bases longas (entre 254 e 672 km), foi detectada uma repetibilidade de 1 cm com precisão média de 0,01 ppm. Silva *et al.* (2015) apresentou o monitoramento planimétrico de barragem com o processamento de dados a partir de software científico e calibração relativa das antenas GNSS em laboratório especializado com acurácia obtida da ordem de poucos milímetros.

Os melhoramentos em termos de qualidade do posicionamento via GNSS recebem forte contribuição de estudos científicos advindos de ciências como a Geodésia e integração com outras, tais como a Geofísica, a Meteorologia, etc. Neste caso, melhorias são obtidas na modelagem matemática dos efeitos atmosféricos e geodinâmicos envolvidos com os sistemas de posicionamento espacial. No entanto, para obtenção de qualidade posicional com a máxima capacidade fornecida pelo GNSS, se faz necessário o uso de softwares científicos (Dach *et al.* 2015), os quais são utilizados atualmente para materialização do SGR com determinação de redes geodésicas tridimensionais, consideradas redes modernas, como por exemplo, a rede SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) disponível no continente americano ou a rede do ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) de caráter global (IBGE, 2016; Torge, 2001; Seeber, 2003; Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Neste contexto, este artigo tem como objetivo apresentar uma

abordagem metodológica para o monitoramento de barragens, enfocando de forma complementar um experimento preliminar de monitoramento de Barragem na Usina de Apolônio Sales da CHESF (Companhia Hidroelétrica do São Francisco) localizada em Paulo Afonso/BA, a partir da análise de acurácia e de repetibilidade de estimativa de coordenadas em rede geodésica determinada a partir de dados GNSS. A metodologia envolveu o posicionamento GNSS relativo com análise de repetibilidade das estimativas obtidas em algumas sessões e os resultados apontam repetibilidade da ordem de milímetros. A próxima seção apresenta uma breve revisão de literatura sobre o posicionamento por GNSS.

POSICIONAMENTO GNSS RELATIVO E AJUSTAMENTO DE REDES

Atualmente, tem-se disponível uma vasta literatura sobre os métodos de posicionamento GNSS e modelagem matemática necessária para obtenção de coordenadas com alta acurácia, podendo-se citar, por exemplo, Seeber (2003); Leick (2004); Hoffman, *et al.* (2008); Monico (2008) entre outros. De acordo com o documento da *European Commission* (2003) o GNSS diz respeito a capacidade de fornecer posicionamento a nível global baseado em satélites artificiais e também o fornecimento de importantes recursos e características tais como acurácia, integridade, entre outros (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Os sistemas de posicionamento operacionais na atualidade são o GPS e GLONASS, porém outros se encontram em fase de desenvolvimento, tais como o Galileo e Beidou/Compass.

Os satélites GPS transmitem sinais gerados a partir de uma frequência fundamental (f_0) de 10,23

MHz, cuja multiplicação por números inteiros, 154, 120 e 115 permite formar a frequência de cada uma das três portadoras denominadas de L1 (1575,42 MHz), L2 (1227,60 MHz) e L5 (1176,45 MHz). Os sinais são transmitidos com base na técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*), no qual todos os satélites podem transmitir numa mesma frequência e serem identificados pelo seu código PRN (*Pseudo Random Noise*). Diferentemente do GPS, cada satélite GLONASS transmite sinais em frequências específicas. Desta forma, a identificação do satélite se dá pela frequência do sinal, técnica denominada FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) (Seeber, 2003; Leick, 2004; Monico, 2008). Contudo, a partir do processo de modernização, o GLONASS já possui satélites transmitindo dados com base na técnica CDMA. Detalhes sobre os sinais dos satélites GLONASS podem ser encontradas em (Roosbach, 2001; Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

O posicionamento geodésico a partir do GNSS envolve o uso de observações de uma constelação de satélites orbitando a Terra à altitude de aproximadamente 20.000 km. As observações são derivadas de um código gerado pelo sistema, seja o código civil C/A ou o criptografado P. As medidas derivadas são denominadas basicamente de pseudodistância e fase da onda portadora, sendo que a primeira possui incerteza de ordem decimétrica e a segunda de ordem milimétrica. Para que o posicionamento usufrua desta alta

qualidade da medida de fase da portadora é necessário obter solução fixa (número inteiro) da ambiguidade da fase da onda portadora, que se trata de um número inteiro de ciclos contados a partir do satélite (transmissor) até o receptor no momento da primeira coleta realizada no receptor. Este parâmetro é tratado como incógnita no ajustamento das observações, juntamente com outros parâmetros, tais como as coordenadas da estação.

Diversos são os erros e/ou efeitos envolvidos com o sistema podendo-se citar os de natureza atmosférica que afetam os sinais durante sua propagação, aqueles de natureza geodinâmica que afetam as estações ou ainda os erros provocados por atrasos de *hardware* de satélites e receptores, calibração de antenas, entre outros. Para fins de posicionamento geodésico a atmosfera, geralmente é dividida em ionosfera e troposfera que provocam diferentes atrasos no sinal de radio enviado pelo transmissor. Os efeitos geodinâmicos são principalmente aqueles provocados por efeitos de carga de marés oceânicas (*Ocean Tide Loading*), efeitos de marés terrestres (*Earth Body Tide*) e movimento de placas tectônicas (Monico, 2008; Leick 2004).

As equações de pseudodistância e de fase da portadora podem ser escritas como nas equações (1) e (2) e de forma semelhante para qualquer sistema de posicionamento (Seeber, 2003; Monico, 2008; Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008):

$$PD_{L_i}^{GNSS} = \rho + c(dt_{rec} - dt_{sat}) + I_{L_i} + T + Orb + dm + Br + B^s + \theta_{PD_{L_i}} \quad (1)$$

$$\lambda_{L_i} \Phi_{L_i}^{GNSS} = \rho + c(dt_{rec} - dt_{sat}) - I_{L_i} + T + Orb + dm + Br + B^s + \lambda_{L_i} N_{L_i} + \theta_{\Phi_{L_i}} \quad (2)$$

Nas equações 1 e 2, tem-se:

$PD_{L_i}^{GNSS}$ e $\Phi_{L_i}^{GNSS}$ – observação de pseudodistância (m) e de fase (ciclos), respectivamente;

ρ – distância geométrica entre satélite e receptor;

dt_{rec} e dt_{sat} – erro d relógio do receptor e satélite, respectivamente;

N_{L_i} – ambiguidade da fase da onda portadora;

λ_{L_i} – comprimento de onda na frequência L_i ($i=1, 2, 3$);

c – velocidade da luz;

I_{L_i} ; T ; Orb ; dm ; Br e B^s - representam, respectivamente, os erros de ionosfera, troposfera, erro de órbita, multicaminho, atraso de hardware do receptor e do satélite;

$\theta_{PD_{L_i}}$ e $\theta_{\Phi_{L_i}}$ – representam os resíduos aleatórios e não modelados.

O método de posicionamento GNSS que proporciona estimativas com melhor qualidade, principalmente para o caso de linha de base curta, é o método relativo (Fig. 1), no qual dois ou mais receptores (R1 e R2) em diferentes estações coletam dados de satélites GNSS (Sat.1 e Sat.2) simultaneamente.

Neste caso, são realizadas combinações lineares entre as medidas coletadas em duas estações formando as observáveis de Dupla Diferença (DD), onde se estima as componentes do vetor de linha de base.

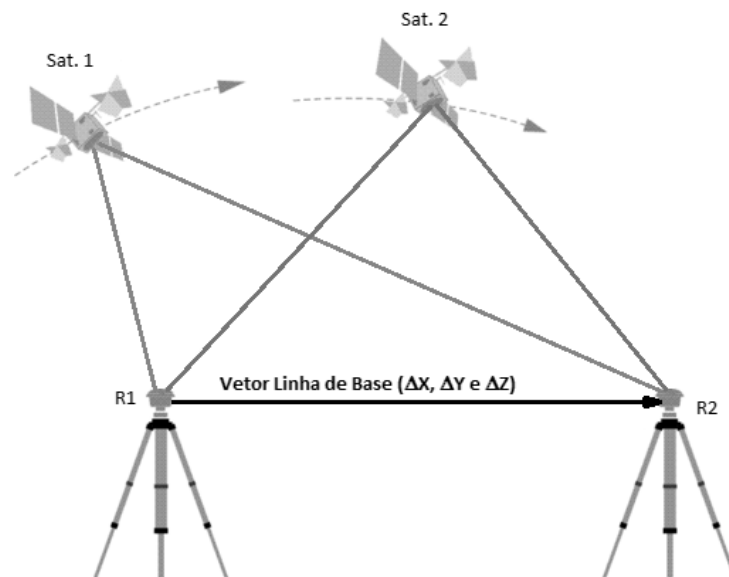


Figura 1 – Representação do posicionamento relativo e vetor de linha de base (Adaptado de <<https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1727>>).

As equações de DDs de pseudodistância e de fase da portadora podem ser escritas da seguinte forma:

$$PD_{DD_{r1r2}^{s1s2}} = \Delta\rho_{r1r2}^{s1s2} + v_{PD_{DD_{r1r2}^{s1s2}}} \quad (3)$$

$$\Delta\phi_{1,2}^{1,2} = \frac{f_{Li}}{c} \Delta\rho_{1,2}^{1,2} + N_{1,2}^{1,2} + v_{\phi_{DD}} \quad (4)$$

em que:

$$\Delta\rho_{r1r2}^{s1s2} = \Delta\rho_{r1r2}^{s1} - \Delta\rho_{r1r2}^{s2} = \rho_{r1}^{s1} - \rho_{r2}^{s1} - \rho_{r1}^{s2} + \rho_{r2}^{s2};$$

$v_{PD_{fj}^{fs}}$ - resíduos e efeitos não modelados da DD da pseudodistância;

$v_{\phi_{DD}}$ - resíduos e efeitos não modelados da DD da fase;

$$N_{1,2}^{1,2} = N_{1,2}^1 - N_{1,2}^2 = N_1^1 - N_2^1 - N_1^2 + N_2^2$$

As equações 3 e 4 representam de forma geral o modelo matemático funcional utilizado no ajustamento por MMQ (Método dos Mínimos Quadrados) no método relativo (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008). Para o caso de linhas de base curtas, o posicionamento relativo permite eliminar a maioria dos erros envolvidos com o GNSS. Para obtenção de posicionamento com alta acurácia, principalmente se forem consideradas linhas de base longa, é necessário aplicar também diversas outras correções.

Em geral, são aplicadas combinações lineares entre observações coletadas em diferentes frequências, como por exemplo, a combinação denominada *ion-free* que permite eliminar os efeitos de primeira ordem da ionosfera. Os efeitos de ordem superior da ionosfera, também podem ser corrigidos conforme recomendações do IERS (*International Earth rotation and Reference System Service*) (IERS *Conventions*, 2010). Outros tipos de combinações, tais como *wide-lane*, *narrow-lane* e outras também podem ser aplicadas, seja para detecção de perdas de ciclos na fase da portadora ou para auxílio ao processo de solução das ambiguidades. Além disto, podem ser aplicados produtos disponibilizados pelos diversos centros internacionais

dentre eles o IGS (*International GNSS Service*), o CODE (*Center for Orbit Determination*), o JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), entre diversos outros. Dentre os produtos disponíveis, têm-se, por exemplo, as órbitas precisas dos satélites, correções de atrasos de *hardwares* (DCBs – *Differential Code Bias*), parâmetros de calibração de antenas, etc. Muito importante se faz a aplicação dos parâmetros de calibração das antenas dos receptores, uma vez que o sinal recebido do satélite se refere ao centro de fase eletrônico da antena do receptor, enquanto a posição é estimada em relação ao centro de fase mecânico (Seeber, 2003; Leick, 2004).

Uma das etapas mais importantes na obtenção dos vetores de linha de base se refere ao processo de solução de ambiguidades como inteiras (solução fixa) e a validação desta solução, assunto que sempre representou um grande desafio em termos de pesquisa para a Geodésia (Teunissen, 1998).

A etapa envolvendo a estimativa do vetor de linha de base é comumente denominada de processamento de linhas de base. Uma vez que se tenham diversos vetores de linha de base formando uma rede GNSS, estes podem fazer parte do ajustamento de uma rede geodésica tridimensional.

O modelo matemático funcional do ajustamento de redes pode ser representado por:

$$\begin{aligned}\Delta X_{ij} &= X_j - X_i \\ \Delta Y_{ij} &= Y_j - Y_i \\ \Delta Z_{ij} &= Z_j - Z_i\end{aligned}\quad (5)$$

em que ΔX , ΔY e ΔZ representam as diferenças de coordenadas entre os pontos P_i e P_j . A solução por MMQ a partir da equação (5) pode ser feita com a introdução de injunções mínimas (Gemael, 1994; Marques e Monico, 2009).

O ajustamento de vetores em rede geodésica tridimensional torna a solução de posicionamento mais rigorosa e deve vir acompanhada da aplicação do controle de qualidade estatístico com etapas de Detecção, Identificação e Adaptação (DIA) de erros grosseiros que estejam presentes nas observações composta dos vetores de linha de base (Gemael, 1994; Teunissen, 1998; Marques e Monico, 2009). A aplicação de todas as correções citada nesta seção e outras, bem como procedimentos rigorosos para obtenção de coordenadas com alta acurácia deve ser realizada com o auxílio de softwares científicos,

principalmente para o caso de linhas de base longas (acima de ~20 km).

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho apresentado neste artigo envolveu a implantação de uma rede Geodésica nas proximidades da Usina Hidroelétrica Apolônio Sales da CHESF (lat. ~ 9°21'S; lon. ~38°12'O) localizada em Paulo Afonso/BA. Foram instalados cinco vértices geodésicos construídos em alvenaria, os quais serão utilizados para monitoramento via métodos clássicos da Geodésia. A localização dos vértices (P1 ao P5) pode ser vista na Figura 2.

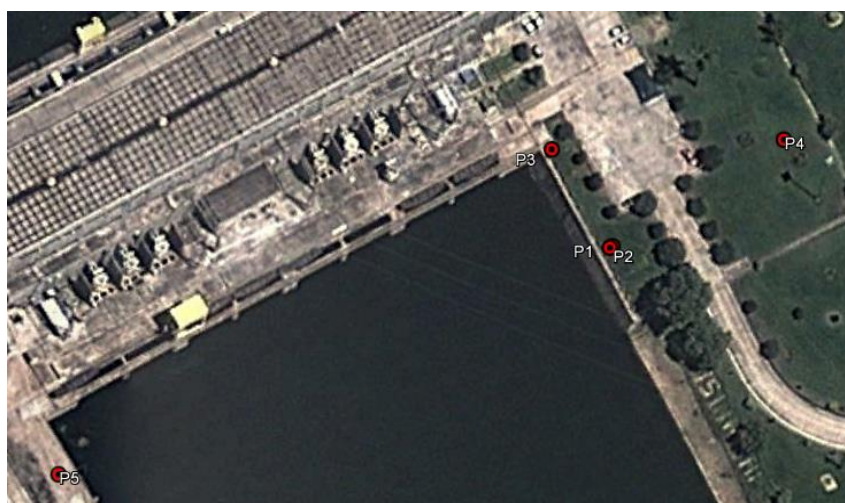


Figura 2 – Localização dos vértices implantados na usina da CHESF (Fonte: Google Earth)

Um dos objetivos do trabalho foi a determinação das coordenadas dos vértices (pilares) implantados nas proximidades da barragem e no caso foi utilizado um par de receptores *Hiper Lite* da marca Topcon (dupla frequência, L1 e L2) para a coleta de dados GNSS. A Figura 3 mostra, como exemplo, os receptores instalados sobre os vértices P1, P2 e P5.

O tempo de coleta em cada vértice da barragem variou de duas a quatro horas de coletas e ao mesmo tempo em que os receptores foram instalados nos marcos geodésicos outros dois receptores foram instalados acima da casa de máquina da barragem com objetivos de realizar os experimentos visando o monitoramento de deslocamento da barragem via GNSS. No caso, trata-se de uma simulação de monitoramento, visto que não se tem os devidos pinos de centragem forçada sobre os vértices na barragem, contudo, o objetivo é investigar e propor a metodologia de monitoramento a partir do posicionamento GNSS.

Os dois vértices na barragem foram instalados sobre tripé e foram

tomados os devidos cuidados de orientar todos os receptores para uma mesma direção visando minimizar efeitos devido à variação de centro de fase das antenas (PCV – *Phase Center Variation*). É importante ressaltar que para uma solução mais rigorosa do posicionamento, faz-se necessário realizar a calibração das antenas GNSS para obtenção dos parâmetros de PCV, bem como procedimentos para redução de efeitos de multicaminho tal como apresentado por Silva, et al. (2015).

A estimativa das coordenadas dos marcos geodésicos da barragem foi realizada fazendo uso das observações GNSS coletadas nas estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo). Foram escolhidas cinco estações para formar a rede geodésica: CRAT (Crato/CE), PEAf (Afogados da Ingazeira/PE), ALAR (Arapiraca/AL), SEAJ (Aracaju/SE), PEPE (Petrolina/PE). A Figura 4a mostra a formação da rede geodésica e a Figura 4b a formação de linhas de base entre os vértices da barragem (P1, P2, P3, P4 e P5).



Figura 3 – Vértices geodésicos P1 e P2 (esquerda) e P5 (direita) com receptores GNSS instalados

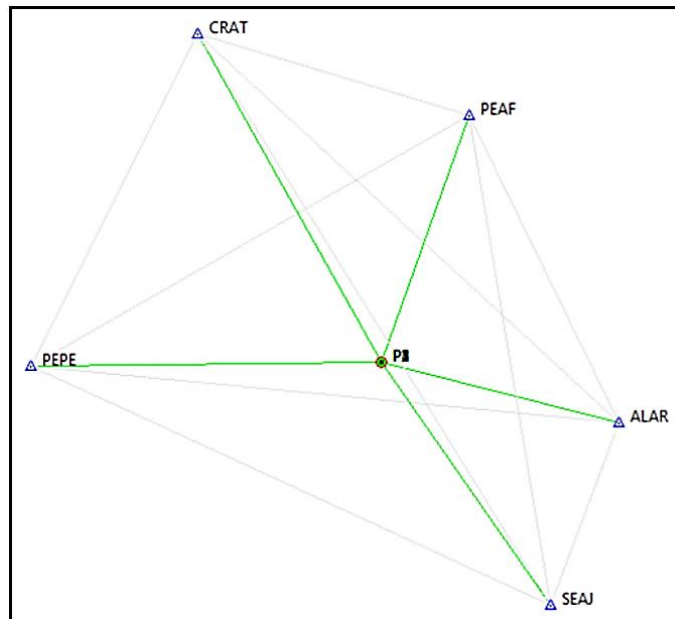


Figura 4a – Formação da rede geodésica com estações da RBMC (situação sem escala)

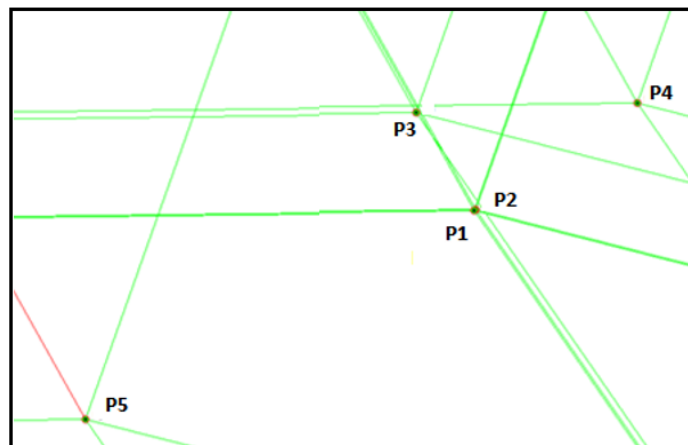


Figura 4b – Formação de linhas de base entre os vértices da barragem (situação sem escala)

Os receptores instalados acima da barragem (pontos de monitoramento) coletaram dados simultaneamente com os receptores instalados nos vértices geodésicos de concreto (marcos). Os pontos de monitoramento foram denominados de R e B. Foram realizadas coletas de dados com sessões variando de aproximadamente uma até três horas de dados de forma que cada

A Figura 5 apresenta os pontos R e B de monitoramento e as linhas de

vértice apresenta três sessões, ou seja, foram estimados os pontos R01, R02, R03, B01, B02 e B03. Entre uma sessão e outra o receptor foi desligado e ligado novamente com a reinicialização e geração de novos arquivos de observação no formato RINEX (*Receiver Independent Exchange format*) para cada sessão.

base formadas a partir dos vértices geodésicos.

Os dados foram processados no software comercial Topcon-Tools em dois projetos distintos, sendo o primeiro com as estações da RBMC (ver Figura 4) para obtenção das coordenadas dos marcos geodésicos instalados na barragem e o segundo para determinação das coordenadas dos pontos R e B em cada sessão (Fig. 5).

O processamento dos dados no Topcon-Tools para o caso das linhas de base longa foi realizado fazendo uso de órbitas precisas do IGS e máscara de elevação de 15 graus. Para cada projeto, foi realizada a etapa de processamento de linhas de base e na sequência o ajustamento da rede geodésica já que se tem a formação de diversas linhas, o

que fornece redundância para o ajustamento da rede. Neste caso, foram tomados os devidos cuidados em relação ao uso de linhas de base independentes para que não ocorra dependência linear na etapa de ajustamento da rede geodésica.

Após estimativa das coordenadas dos vértices R e B em cada sessão foi realizada análise de precisão da estimativa, bem como análise de repetibilidade das coordenadas. Neste último caso, consideram-se as discrepâncias ou diferenças obtidas entre as coordenadas advindas de cada estimativa, bem como a sua dispersão. A próxima seção apresenta os resultados obtidos e análises.

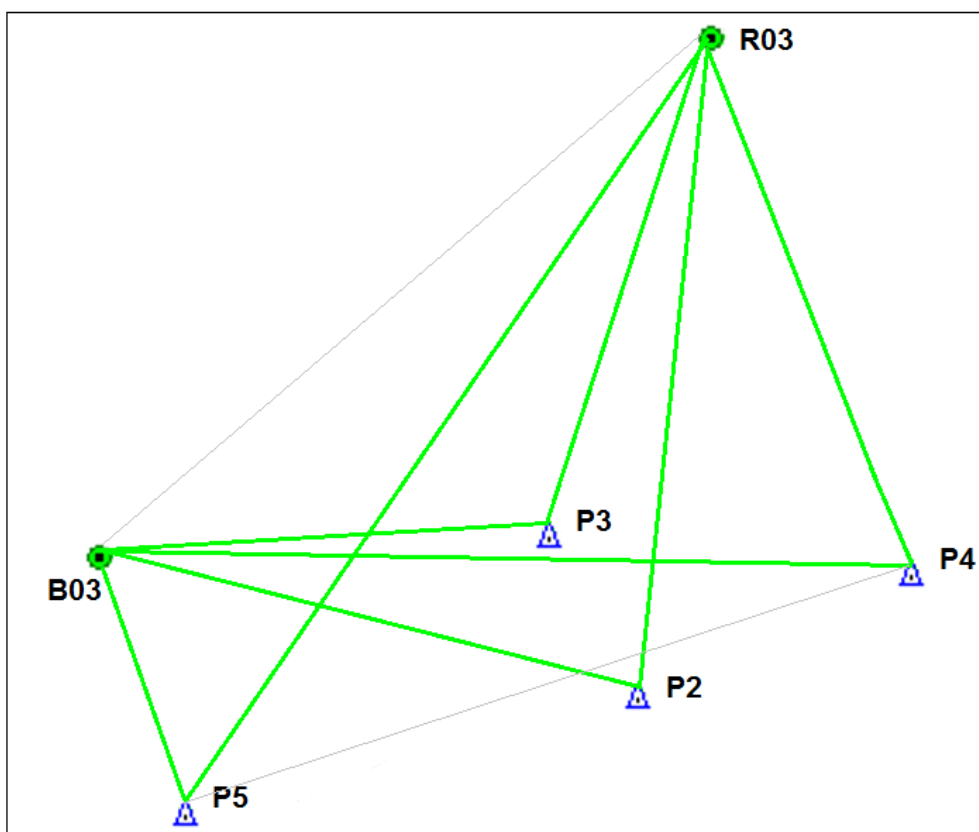


Figura 5 – Vértices R e B de monitoramento e linhas de base para os marcos geodésicos (situação sem escala)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira etapa dos experimentos realizados envolveu a estimativa das linhas de base com objetivos de determinar as coordenadas dos vértices geodésicos (P1, P2, P3, P4 e P5) implantados na barragem. A segunda etapa consiste em analisar a repetibilidade nas coordenadas dos vértices de monitoramento da barragem (R01, R02, R03; B01, B02 e B03), cuja estimativa foi realizada fazendo uso dos dados coletados em todas as estações e também injuncionando as coordenadas

dos vértices geodésicos estimadas na primeira etapa. Desta forma, os resultados referentes à primeira etapa serão apresentados na seção 4.1 e as análises de repetibilidade da etapa 2 serão apresentadas na seção 4.2.

Determinação dos vértices geodésicos da barragem e análise de qualidade

A Tabela 1 apresenta a duração do tempo de coleta em entre cada vetor formado, o tipo de solução das ambiguidades, distância e precisões estimadas das linhas de base.

Tabela 1 – Informação das linhas de base processadas na determinação dos vértices geodésicos

Do Ponto	Para o Ponto	Tempo de coleta	Distância (m)	Precisão Horizontal (m)	Precisão Vertical (m)
ALAR	P5	01:03:15	176099,019	0,056	0,038
ALAR	P2	04:33:45	175980,324	0,031	0,055
ALAR	P1	04:33:45	175980,842	0,030	0,056
ALAR	P3	01:51:15	176001,393	0,027	0,057
ALAR	P4	03:23:00	175947,031	0,047	0,043
CRAT	P5	01:03:15	269599,062	0,072	0,047
CRAT	P2	04:33:45	269620,052	0,042	0,066
CRAT	P1	04:33:45	269620,031	0,041	0,067
CRAT	P3	01:51:15	269590,989	0,037	0,069
CRAT	P4	03:23:00	269617,069	0,059	0,052
PEAF	P5	01:03:15	187420,777	0,056	0,041
PEAF	P2	04:33:45	187324,468	0,051	0,041
PEAF	P1	04:33:45	187324,994	0,050	0,042
PEAF	P3	01:51:15	187306,511	0,055	0,040
PEAF	P4	03:23:00	187285,038	0,048	0,045
PEPE	P5	01:03:15	252400,327	0,039	0,065
PEPE	P2	04:33:45	252537,210	0,044	0,061
PEPE	P1	04:33:45	252536,588	0,044	0,061
PEPE	P3	01:51:15	252522,148	0,033	0,068
PEPE	P4	03:23:00	252578,939	0,037	0,066
SEAJ	P5	01:03:15	211742,887	0,061	0,035
SEAJ	P2	04:33:45	211709,126	0,054	0,043
SEAJ	P1	04:33:45	211709,206	0,041	0,056
SEAJ	P3	01:51:15	211738,207	0,061	0,034
SEAJ	P4	03:23:00	211707,825	0,055	0,043

Tipo de Solução da Ambiguidade: *Float e Fixed*

A partir da Tabela 1 verifica-se que se as linhas de base formadas a partir das estações da RBMC são linhas consideradas longas com distância mínima de aproximadamente 175 km para a estação ALAR e máximo de aproximadamente 296 km para a estação CRAT. A taxa de solução das ambiguidades como fixa foi de aproximadamente 50%. As precisões estimadas das linhas de base apresentaram valores máximo e mínimo, respectivamente de 0,072 m e 0,027 m para a componente horizontal. No caso da componente vertical, os valores máximo e mínimo foram respectivamente de 0,069 m e 0,034 m.

A próxima etapa após o processamento das linhas de base é o ajustamento da rede geodésica. Ao aplicar o ajustamento da rede, algumas linhas de base foram rejeitadas na etapa de controle de qualidade, principalmente aquelas com maior distância como é o caso das linhas formadas pelas estações CRAT e PEPE. As precisões estimadas de cada vértice no ajustamento da rede geodésica podem ser vistas na Tabela 2.

A partir da Tabela 2, verifica-se que as precisões na componente horizontal ($\sigma_{\text{Horizontal}}$) foram da ordem de poucos centímetros com máximo de 4,6 cm para o vértice P5 e mínimo de 1,8 cm para o vértice P3. Para o caso de monitoramento com equipamentos geodésicos clássicos, os valores das coordenadas destes vértices podem ser tomados como injeção fixa ou relativa no processo de estimativa de outros pontos instalados na barragem, visando seu monitoramento.

Análise de repetibilidade dos vértices de monitoramento

As coordenadas dos vértices P1 a P5 estimadas na primeira etapa (seção 4.1) foram injuncionadas para o processamento das linhas de base formadas para os pontos R e B. A injeção foi na forma relativa, fazendo uso das precisões estimadas de cada vértice de injeção. A Tabela 3 apresenta as informações de processamento de linhas de base formadas em cada sessão de coleta de dados.

Tabela 2 – Precisões estimadas para os vértices da barragem

Pontos	σ_E (m)	σ_N (m)	σ_h(m)	σ Horizontal (m)
P1	0,011	0,018	0,030	0,021
P2	0,010	0,019	0,028	0,022
P3	0,009	0,015	0,022	0,018
P4	0,009	0,032	0,029	0,034
P5	0,017	0,043	0,032	0,046

Tabela 3 – Informação das linhas de base na determinação dos pontos de monitoramento

Do Ponto	Para o Ponto	Duração (h)	Distância (m)	Precisão Horizontal (m)	Precisão Vertical (m)
P3	B01	00:45:12	193,4857	0,0009	0,0028
P4	B01	00:41:12	249,5474	0,0007	0,0021
P2	B02	03:00:16	205,4269	0,0007	0,0013
P1	B02	03:00:16	204,7871	0,0006	0,0012
P5	B03	01:03:15	80,6100	0,0008	0,0013
P4	B03	01:41:20	249,5457	0,0008	0,0014
P1	R03	02:39:57	116,3952	0,0006	0,0012
P2	R03	02:39:57	116,0219	0,0006	0,0012
P3	R02	01:38:05	94,7169	0,0010	0,0023
P4	R01	01:41:26	94,6036	0,0008	0,0014
P4	R02	01:34:05	94,6030	0,0007	0,0017
P5	R01	01:03:15	222,7187	0,0009	0,0015

Tipo de Solução da Ambiguidade: *Fixed*

Todas as linhas processadas tiveram suas ambiguidades solucionadas como fixa (solução inteira de ambiguidade). Verifica-se que as linhas de base são consideradas curtas com distância máxima de aproximadamente 250 m. As precisões na componente horizontal variaram de 0,6 mm a 1 mm e na vertical a variação foi de 1,2 mm a 2,8 mm como pode ser visto na Tabela 3. A Tabela 4 apresenta as precisões das coordenadas estimadas na etapa de ajustamento da rede.

Como pode ser verificado na Tabela 4, as precisões dos vértices R e

B em cada sessão variam de aproximadamente 6 mm na componente horizontal até 15 mm na vertical.

A repetibilidade da estimativa, para o caso deste trabalho foi obtida calculando-se as diferenças entre as coordenadas estimadas em cada sessão juntamente com a média das diferenças e respectivo desvio padrão. A Tabela 5 apresenta as diferenças entre as coordenadas de cada sessão, sendo que R02 - R01 representa, por exemplo, as diferenças entre as coordenadas do vértice R nas sessões 01 e 02.

Tabela 4 – Precisões estimadas para os vértices de monitoramento

Vértice	σ_E (m)	σ_N (m)	σ_h (m)	σ Horizontal (m)
R01	0,0060	0,0060	0,0158	0,0086
R02	0,0060	0,0060	0,0157	0,0086
R03	0,0071	0,0071	0,0153	0,0101
B01	0,0060	0,0060	0,0157	0,0085
B02	0,0071	0,0071	0,0153	0,0101
B03	0,0060	0,0060	0,0158	0,0085

Tabela 5 – Repetibilidade nas coordenadas obtidas em cada sessão nos pontos R e B

	DX (m)	DY (m)	DZ (m)
R02 - R01	0,0021	0,0011	-0,0004
R03 - R02	-0,0008	-0,0004	-0,0104
R03- R01	0,0013	0,0007	-0,0108
B02 - B01	0,0027	-0,0001	-0,0098
B03- B02	-0,0012	0,0004	0,0142
B03 - B01	0,0015	0,0003	0,0044

Tabela 6 – Média e Desvio Padrão entre soluções de cada sessão

	Pontos	DX (m)	DY (m)	DZ (m)
Média	R	0,0009	0,0005	-0,0072
	B	0,0010	0,0002	0,0029
Desvio Padrão	R	0,0015	0,0008	0,0059
	B	0,0020	0,0003	0,0121

Os valores mínimo e máximo para o caso da média foram respectivamente de 0,2 mm na componente Y do vértice B e de -7,2 mm na componente Z do vértice R. O desvio padrão apresentou mínimo de 0,3 mm e máximo de 12,1 mm, respectivamente, nas componentes Y e Z do vértice B. Os valores apresentados na Tabela 6 estão de acordo com a própria incerteza horizontal das coordenadas estimadas como pode ser visto na Tabela 4.

CONCLUSÕES

Neste artigo foram apresentados conceitos envolvidos com o monitoramento de barragens hidro-elétricas envolvendo o posicionamento via GNSS. Além da revisão de literatura e abordagem metodológica foram apresentados resultados preliminares com a coleta de dados em uma rede geodésica implantada nas proximidades da barragem da usina hidroelétrica da CHESF em Paulo Afonso - BA.

O método de posicionamento utilizado foi o relativo, seja para a determinação das coordenadas da rede

geodésica implantada (seção 4.1) bem como para o experimento envolvendo a determinação das coordenadas dos vértices instalados na barragem (seção 4.2).

Em relação ao experimento realizado, a metodologia adotada envolveu a coleta de dados em algumas sessões variando de aproximadamente uma até três horas de coleta. As estimativas obtidas a partir de cada sessão de coleta de dados foram analisadas em termos de qualidade e também de repetibilidade. No caso, foram adotadas as devidas estratégias para minimizar os efeitos sistemáticos como, por exemplo, a orientação das antenas para uma mesma direção entre outras.

Para o processamento dos dados foi utilizado software comercial com a aplicação de órbitas precisas para o caso de linhas longas ao utilizar dados da RBMC para a determinação das coordenadas dos vértices da rede geodésica implantada. Neste caso, a precisão da estimativa das coordenadas após ajustamento de rede foi da ordem poucos centímetros. As coordenadas estimadas da rede foram utilizadas

como referência para a determinação dos vértices de monitoramento na barragem.

Algumas considerações são importantes com relação aos experimentos apresentados, visto que se trata de uma coleta de dados com apenas três sessões de poucas horas e, para uma análise mais conclusiva se faz necessário maior tempo de coleta com a geração de longa série temporal. Além disto, todos os resultados foram gerados com base em software comercial, mesmo que, foram adotados procedimentos rigorosos em termos de coleta e utilização de produtos precisos disponíveis, como por exemplo, o uso de órbitas precisas. Contudo, é importante citar que o estado da arte atual em obtenção da estimativa de coordenadas geodésicas envolve o uso de softwares científicos, os quais são utilizados, por exemplo, pelos grandes centros nacionais e internacionais para a estimativa de coordenadas de redes geodésicas intercontinentais, tal como, as redes ITRF e SIRGAS.

Em relação à determinação das coordenadas nos vértices da barragem (Vértices R e B), a solução de ambiguidades no processamento de linhas de base foi sempre fixa e a precisão horizontal das linhas de bases variou de 0,6 a 1 mm e enquanto que a precisão vertical variou de 1,2 a 2,8 mm (Tabela 3). Após o ajustamento de rede, a precisão dos vértices de monitoramento variou de aproximadamente 8 mm a 1 cm. Ao analisar a repetibilidade das estimativas de cada sessão, verifica-se que valores mínimo e máximo para o caso da média foram respectivamente de 0,2 mm na componente Y do vértice B e de -7,2 mm na componente Z do vértice R. Desta forma, pode-se dizer que repetibilidade na estimativa analisada a partir da diferença e desvio padrão entre as estimativas apresentaram resultados

satisfatórios para o caso dos experimentos apresentados.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Companhia Hidroelétrica do São Francisco por todo apoio material e operacional concedido para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Brasil. Lei nº 12.334, de 1 de maio de 1943. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.
- Bond, D.J., 2007. Bringing GPS into harsh environments for deformation monitoring. Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 253, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 268 pp.
- Chaves, J. C., 2001. Uso da Tecnologia GPS na Monitoração de Deformações: Sistemas, Etapas e Experimentos. Tese de Doutorado. Curso de Transportes, USP- São Carlos, 155p.
- Dach, R., S. Lutz, P. Walser, P. Fridez., 2015. Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual, Astronomical Institute, Universität of Bern, Bern Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9.
- Fazan, J.A., 2010. Aplicação do teste de congruência global e análise geométrica para detecção de deslocamentos em redes geodésicas: Estudo de caso na UHE de Itaipu. Dissertação de Mestrado,

- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 248p.
- Gemael, C. Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas. Curitiba: Editora da UFPR, 1994. 319p.
- Granemann, D. C.; Faggion, P. L.; Veiga, L. A. K.; Nadal, C. A.; De Freitas, S.R.C., 2008. Estabelecimento de Uma Rede Geodésica para o Monitoramento de Estruturas: Estudo de Caso na Usina Hidrelétrica de Salto Caxias. Boletim de Ciências Geodésicas, 14: 200-220.
- Gusmão Filho, J., 2006. Desempenho de Obras Geotécnicas, Recife, Editora Universitária da UFPE, 264p.
- Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Wasle, E., 2008. GNSS - Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, GALILEO & more. New York: Springer-Verlag, 516p.
- Hudnut, K. W.; Behr, J. A., 1998. Continuous GPS Monitoring of Structural Deformation at Pacoima Dam, California. Seismological Research of Letters, 69: 299-308.
- IBGE. 2016. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Resolução do Presidente do nº 1/2005. Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_25fev2005.pdf>. Acesso em outubro de 2016.
- Kuang S., 1991. Optimization and design of deformation monitoring schemes, Ph.D. dissertation - Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 157, University of New Brunswick, Fredericton, 180p.
- Liu, C., Gao, J., Zhao, X., Zhang, A., Yu, X., 2014. Simulation and experiment analysis of dynamic deformation monitoring with the integrated GPS/pseudolite system. Journal of Geophysics and Engineering. 12: 45-56.
- Janssen, V., & Rizos, C., 2003. Processing mixed-mode GPS network processing approach for deformation monitoring applications, Survey Review, 37(287): 2-19.
- Jiang-Xiang, G., & Hong, H., 2009. Advanced GNSS technology of mining deformation monitoring, Procedia Earth and Planetary Science. Elsevier, 1: 1081-1088.
- Leick, A., 2004. GPS satellite surveying. 3ª ed.: New York: John Wiley & Sons, 435p.
- Marques, H. A. S., 2013. Modelo Estocástico para Dados GNSS e Séries Temporais de Coordenadas GNSS. Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista – FCT/UNESP, Presidente Prudente - SP. 205p.
- Marques, H. A. S.; Monico, J. F. G. Ajustamento de Redes GPS em Conformidade com as Exigências da Lei 10.267/2001. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 15, p. 514-526, 2009.
- Nisha, R., 2014. Application of GPS in structural deformation monitoring: A case study on Koyna dam. In: Journal of Geomatics, 8.
- Oleynik, E., 2011. GLONASS: Status and Modernization. In: United Nations International Meeting on the Applications of Global Navigation Satellite Systems, Vienna, Austria.
- Icold. 2003. Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Eletrobrás, 279p.

- Ribeiro, F.C.D., 2008. Proposta de metodologia para verificação da estabilidade dos pilares de redes para monitoramento geodésico de barragens – estudo de caso. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, 164p.
- Seeber, G., 2003. Satellite geodesy: foundations, methods, and applications. 2ª ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 589p.
- Shen, C. A., 2004. Method for Processing Data from a Regional Continuous Crustal Deformation GPS Monitoring Network. M.Sc. thesis – Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 221, University of New Brunswick, Fredericton, Canada.
- Silva, E. F.; Miranda, C. D. M.; Monico, J. F. G. 2015. O uso de receptores GPS no monitoramento planimétrico na UHE Luiz Eduardo Magalhães. In: Comitê Brasileiro de Barragens, XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens Foz do Iguaçu – PR, 2015.
- Suci, F. M.; Faggion, P. L., 2012. Análise da estabilidade da rede geodésica de monitoramento da UHE Salto Caxias a partir de dados GPS. Boletim de Ciências Geodésicas, 18:564-582.
- Taşccedil, L., 2010. Analysis of dam deformation measurements with the robust and non-robust methods. Scientific Research and Essays, 5(14): 1770-1779.
- Teixeira, N. N., 2001. Detecção e análise de deslocamento vertical utilizando o Sistema NAVSTAR-GPS. Dissertação de Mestrado, curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 112 p.
- Teixeira, N. N.; Ferreira, D.L.D., 2005. Estabelecimento de redes geodésicas locais de alta precisão para o monitoramento de movimentos da crosta - estudo de caso de uma barragem de usina hidrelétrica. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, PR, 11: 20-35.
- Teunissen, P. J. G., 1998. Quality control and GPS. In: Teunissen, P. J. G.; Kleusber, A. GPS for Geodesy, 2ª ed. Springer-Verlag, Berlin. 407p.
- Torge W., 2001. Geodesy: The concepts, Walter de Gruyter – Berlin, 3ª Edition. 416p.