

Fatores que influenciam no monitoramento geodésico de barragens utilizando estação total

Factors influencing geodetic monitoring of dams using total station

Andreas Jerke¹; Wander da Cruz²; Pedro Luís Faggion³

- ¹ Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba/PR, Brasil. Email: andreas_jerke@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9476-5201>
- ² Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba/PR, Brasil. Email: wanderdacruz@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0738-1283>
- ³ Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba/PR, Brasil. Email: pedro.faggion@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4881-8720>

Resumo: Este artigo analisa a influência de agentes externos durante o monitoramento geodésico de estruturas, estudo de caso na barragem da Usina Hidrelétrica (UHE) de Mauá-PR, combinando o método de posicionamento por satélite utilizando GNSS com o método de irradiação utilizando Estação Total robotizada para determinar eventuais movimentos de pontos de monitoramento da barragem. Os procedimentos adotados consistem em comparar os resultados do monitoramento realizado com as comportas do vertedor abertas com os resultados do mesmo monitoramento realizado com as comportas do vertedor fechadas e, conseqüentemente, analisar se a abertura do vertedor interfere na precisão do monitoramento geodésico, uma vez que o vertedor se localiza no centro da barragem. Após o processamento dos dados foram feitas análises onde verificou-se que o fato da barragem estar com o vertedor aberto, afeta a precisão das coordenadas no corpo da barragem à jusante apresentando valores significativamente diferentes das coordenadas com o vertedor aberto ou fechado. Paralelamente, com o mesmo equipamento, realizou-se o monitoramento de pontos engastados na crista da barragem à montante onde observou-se que dependendo do ponto da rede geodésica utilizado para a determinação das coordenadas dos pontos na crista da barragem, margem direita, esquerda ou sobre a barragem as coordenadas também apresentam variações significativas.

Palavras-chave: Monitoramento Geodésico; Monitoramento de Barragens; Estação Total

Abstract: This paper analyzes the influence of external agents during the geodetic monitoring of structures, a case study at the dam of the Hydroelectric Power Plant (UHE) in Mauá-PR, combining the satellite positioning method using GNSS with the irradiation method using robotic Total Station for determine eventual movements of monitoring points embedded in the dam parameter downstream and in the crest of the upstream bus. The procedures adopted consist of comparing the results of the monitoring carried out with the spillway gates opened with the results of the same monitoring carried out with the spillway gates closed and, consequently, analyzing whether the opening of the spillway interferes with the geodetic monitoring since, the spillway located in the center of the dam. Parallel to this, with the same equipment, the monitoring of points embedded in the crest of the upstream dam was carried out from two pillars, one on the left bank, another on the right bank of the reservoir and two systems of forced centering on the dam. After processing the data, analyzes were made where it was found that the fact that the dam has an open spillway affects the determination of the coordinates in the body of the dam downstream, presenting values significantly different from the coordinates with the open or closed spillway. It was also observed that depending on the point of the geodetic network used to determine the coordinates of the points on the crest of the dam, right, left margin or on the dam the coordinates also show significant variations.

Keywords: Geodetic monitoring; Monitoring of dams; Total Station.

1. Introdução

Para garantir as necessárias condições de segurança das barragens ao longo da sua vida útil, devem ser adotadas medidas de prevenção e controle. Essas medidas asseguram uma probabilidade de ocorrência de acidente reduzida ou praticamente nula. Porém, devem ser periodicamente revisadas levando-se em consideração eventuais alterações resultantes do envelhecimento e deterioração das estruturas (ANA, 2018).

Para se estabelecer um controle do uso e da segurança da barragem são necessários diversos procedimentos visando à gestão e o controle do sistema da barragem para que novos desastres sejam evitados. O monitoramento contínuo voltado para a segurança e integridade de sua estrutura utilizando medições geodésicas têm sido eficientes para controle.

Monitorar uma estrutura do ponto de vista do posicionamento geodésico significa determinar e comparar as coordenadas de pontos de monitoramento em duas épocas distintas, verificando e analisando se houveram variações, dentro de um nível de significância, nestas coordenadas (SILVEIRA, 2006).

O primeiro registro de monitoramento de barragens foi em Cantaria de Grosbois, na França. Em 1853, medições geodésicas foram realizadas nesta barragem para a observação dos deslocamentos da crista. Essa barragem havia apresentado inúmeros problemas desde o início do enchimento do reservatório em 1838 e teve que ser reforçada em mais de uma ocasião. Sendo assim, a partir de 1853, medições geodésicas tornaram-se prática comum em barragens (SILVEIRA, 2006; DA CRUZ, 2015; JERKE, 2019).

No âmbito acadêmico, o número de trabalhos relacionados ao monitoramento de grandes estruturas antrópicas (construídas pelo homem) vem aumentando nos últimos anos.

Na China, Jingzhan (2002) comparou o resultado do monitoramento de deformação da barragem da UHE Ertan entre a Estação Total TCA2003, T3000 Electronic Weiwei e DI2002 Range Finder, todas com a mesma precisão no mesmo conteúdo de trabalho, no mesmo plano de observação, no mesmo período de observação e realizado sob as mesmas condições da área de teste. Jingzhan (2002) concluiu que as observações da Estação Total TCA2003, T3000 e DI2002 são muito diferentes em termos de eficiência de observação, indicando que a estação total TCA2003 é significativamente melhor que outros instrumentos de mesma precisão.

Na University of New Brunswick - Canadá, Chrzanowski e Szostak-Chrzanowski (2009) realizaram um estudo sobre os velhos problemas e as novas soluções no monitoramento de estruturas, concluindo que os efeitos das condições atmosféricas modificáveis nas medições geodésicas e os efeitos da baixa confiabilidade da instrumentação utilizada ainda permanecem como os principais problemas dos sistemas de monitoramento atuais. Com base nas conclusões desta pesquisa, estes efeitos foram tratados durante o monitoramento da barragem da UHE Mauá.

Chen et al. (2013) realizaram um estudo sobre a aplicação do GeoMos no monitoramento automático da área protegida de um metrô onde os resultados mostraram que o GeoMos trabalhando em conjunto com o Estação Total TM30 atende aos requisitos de precisão no monitoramento de deformação da área protegida do metrô e fornece referências técnicas para monitoramento de deformação de projetos similares.

Ainda na China, Wenchun e Zhengyuan (2018) pesquisaram sobre a aplicação do software de monitoramento automático GeoMos no monitoramento de assentamentos do túnel do metrô de Shenyang, avaliando a precisão dos dados coletados e realizando análises de viabilidade desse sistema no projeto de monitoramento de assentamentos. Esta pesquisa estabeleceu a importância teórica e o valor prático do GeoMos para projetos de monitoramento de engenharia de trânsito ferroviário urbano.

No Brasil, pesquisadores do grupo Geodésia Aplicada a Engenharia do PPGCG da UFPR, vinculado ao CNPq desenvolve atividades de pesquisa em barragens desde o final da década de 70, com ênfase em auscultação geodésica para verificar o movimento da crosta terrestre. Sendo que a partir do ano de 2003 também se desenvolveram pesquisas voltadas para o monitoramento de barragens.

Da Cruz (2015) integrou as observações derivadas do monitoramento de barragens no estudo de caso da UHE Mauá, efetuando a análise e a representação de deslocamentos, utilizando vetores e elipses de erro, a partir de um sistema computacional especialmente desenvolvido para este fim.

Jerke (2019) realizou o monitoramento da UHE Mauá, integrando técnicas espaciais GNSS e de levantamentos terrestres para determinação de coordenadas e analisou o resultado do monitoramento feito com equipamentos, com precisões de 1" e de 5", e com diferentes softwares de processamento, um comercial para monitoramento em tempo real e outro desenvolvido por Da Cruz (2015), concluindo que tanto o processamento feito com o software comercial quanto o processamento realizado com o software desenvolvido por Da Cruz apresentaram resultados significativamente iguais em ambos equipamentos analisados.

Neste contexto, esta pesquisa visa analisar a influência do vertedor aberto, no resultado do monitoramento geodésico, para os pontos de jusante e a influência da posição da estação à montante, para os pontos localizados na crista da barragem da UHE Mauá. Cabe salientar que para garantir a estabilidade dos pontos da rede geodésica de referência, os vértices da mesma foram rastreados durante três seções de 8 horas contínuas utilizando GNSS. Este posicionamento geodésico serviu para garantir a estabilidade da rede que será utilizada como referência para o monitoramento dos pontos irradiados no corpo da barragem utilizando estação total robotizada.

Os resultados encontrados mostram diferenças significativas nas coordenadas tanto à jusante como à montante da barragem.

2. Metodologia

Para o desenvolvimento desta pesquisa realizou-se como estudo de caso o monitoramento geodésico da barragem da UHE Mauá, sendo que durante os trabalhos foi verificado que alguns fatores podem influenciar o resultado do monitoramento.

A UHE Mauá situa-se na região centro-oeste do Paraná, posicionada nas coordenadas $24^{\circ}02'24''$ de latitude Sul e $50^{\circ}41'33''$ de longitude Oeste como mostra a Figura 1. Está construída na região do Salto Mauá do rio Tibagi, na divisa entre os municípios de Telêmaco Borba e Ortigueira (LACTEC, 2018).

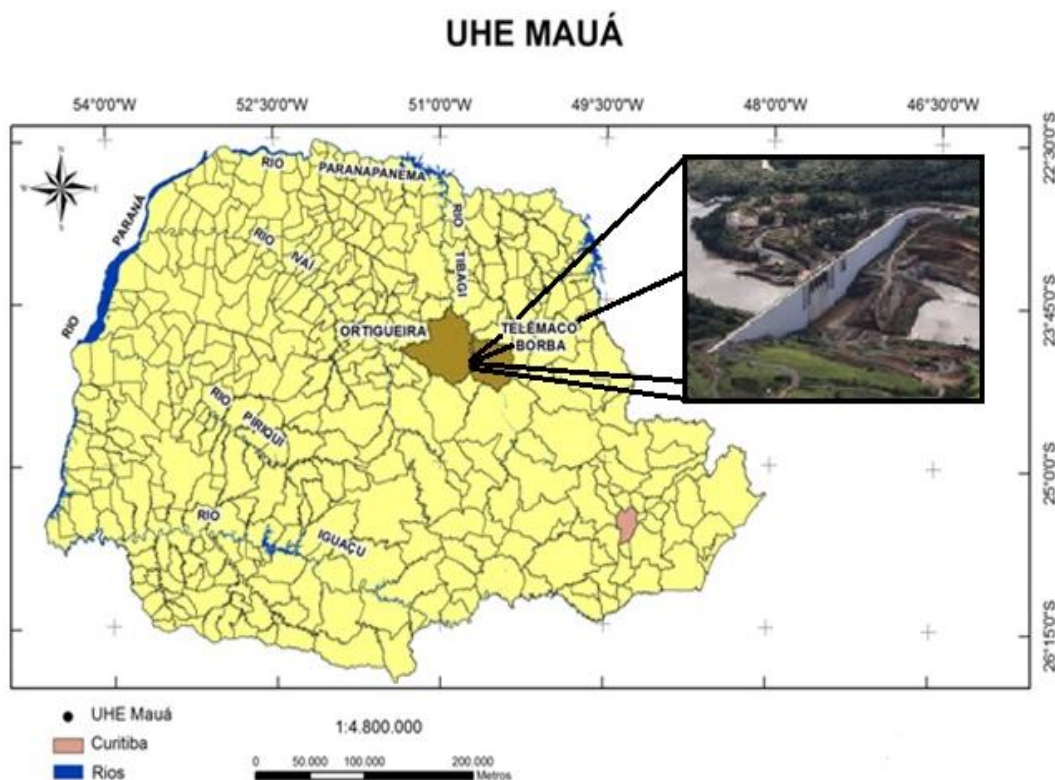


Figura 1 – Localização da UHE Mauá no estado do Paraná.

Fonte: Siguel (2013).

A rede geodésica de referência da UHE Mauá é composta por dois Pilares Geodésicos à montante PG01 e PG02 e um pilar à jusante PG03. Estes têm suas posições materializadas através de sistemas de centragem forçada. Além disso, dois dispositivos de centragem forçada são instalados na crista da barragem CG01 e CG02 permitindo uma ligação entre os pontos à montante e à jusante como mostra a Figura 2.

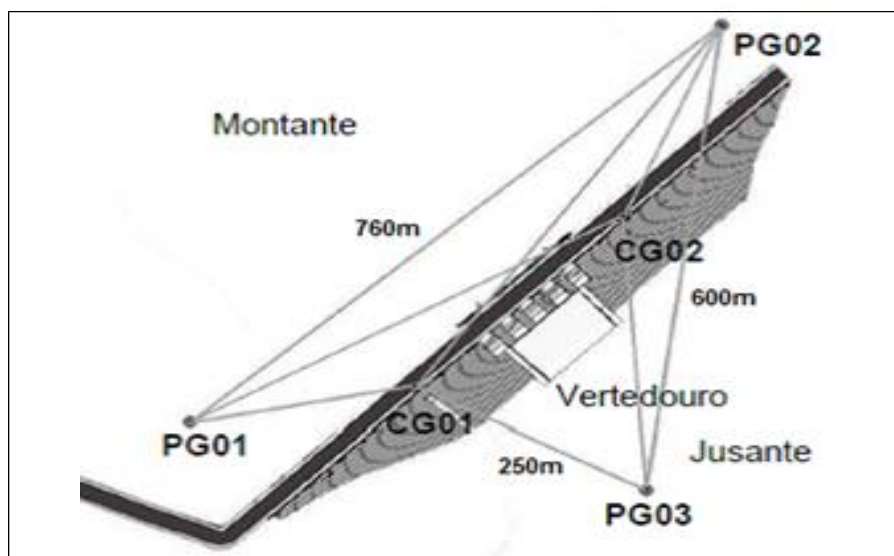


Figura 2 – Disposição da Rede Geodésica de Referência.

Fonte: Siguel (2013).

Os cinco marcos geodésicos da rede são ocupados simultaneamente por receptores GNSS com tempo mínimo de rastreamento de 6 horas. Os receptores são identificados em relação aos marcos geodésicos de modo a utilizar o mesmo conjunto marco-receptor em todas as campanhas a fim de se obter as coordenadas dos pilares com os mesmos equipamentos.

Realizou-se duas seções de rastreamento a uma taxa de 5 segundos nos dias 24/04/2018 e 09/08/2018. No processamento dos dados GNSS utilizou-se uma máscara de elevação de 10° e efemérides precisas, fornecidas pelo IGS – International GNSS Service (IGS, 2018). Utilizou-se também parâmetros calibrados para as antenas dos receptores, fornecidos pelo NGS – National Geodetic Survey (NGS, 2018).

No ajustamento foram analisadas todas as combinações possíveis entre as linhas de base disponíveis num raio de 300 km e a melhor solução encontrada foi um arranjo do PG03 com as quatro bases da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) mais próximas, como mostra a Figura 3.

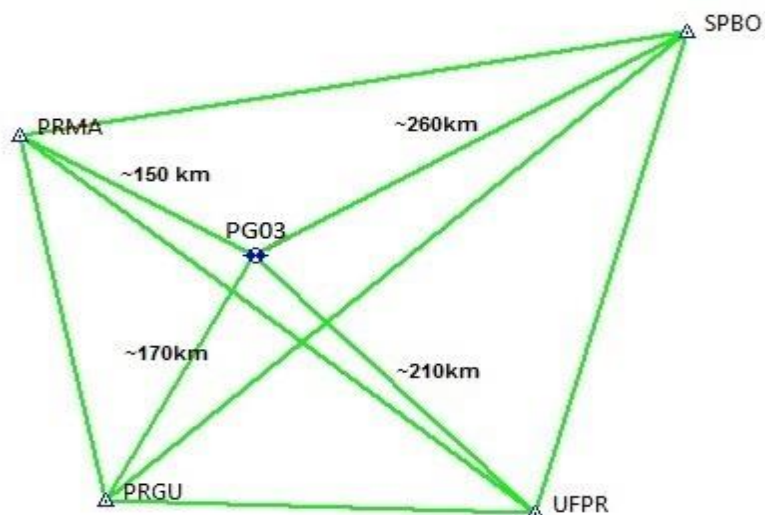


Figura 3 – Geometria de processamento GNSS do PG03.

Fonte: Os autores (2021).

Para realizar o processamento dos demais marcos, utilizou-se o PG03 como referência e pelo método relativo estático determinou-se as coordenadas geodésicas (ϕ , λ e h) dos demais marcos geodésicos como mostra a Figura 4.

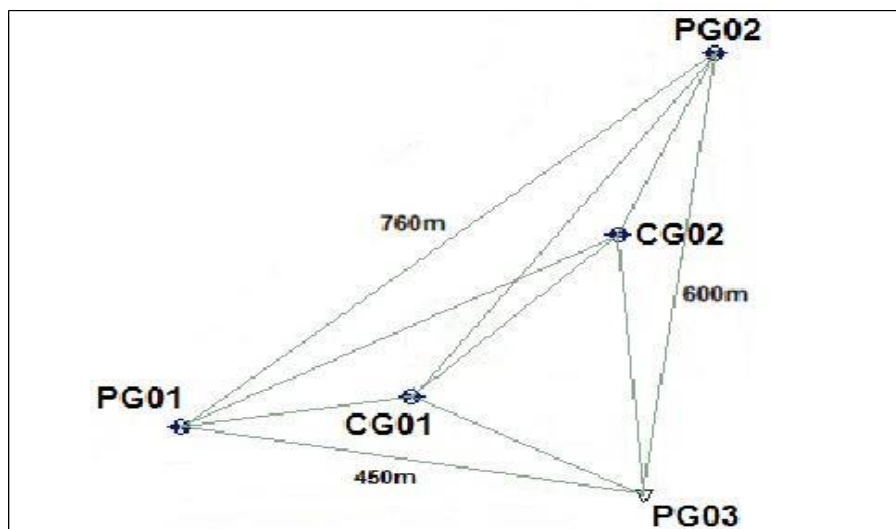


Figura 4 – Geometria de processamento dos demais marcos.
Fonte: Os autores (2021).

Para cada linha de base processada foram analisados os resíduos, onde os trechos ruins de satélites foram eliminados e para se alcançar um resultado único, realizou-se o ajustamento utilizando o próprio software Topcon Tools.

Com o objetivo de facilitar o entendimento e a interpretação do comportamento dos pontos de monitoramento, as coordenadas da rede geodésica são transformadas para um Sistema de referencial cartesiano local, denominado de Sistema de Coordenadas da Barragem (SB), com um eixo no sentido longitudinal da estrutura com orientação positiva na direção da margem direita “XB”, o eixo perpendicular a este e orientação positiva no sentido do fluxo do rio (montante para jusante) “YB” e o eixo "ZB" completando o terno do sistema dextrógiro. (DA CRUZ, 2015).

A Figura 5 ilustra a representação do SB pelos eixos XB e YB.



Figura 5 – Transformação para o SB. Fonte: Da cruz (2015).

Foi necessário realizar quatro campanhas de monitoramento na barragem da Usina Hidrelétrica Mauá, com o intuito de verificar possíveis movimento de pontos de monitoramento durante o período de observações com o vertedor aberto e com o vertedor fechado.

Na primeira campanha, com o vertedor fechado, realizou-se o levantamento GNSS da rede Geodésica e o levantamento dos pontos de monitoramento através da técnica da irradiação a fim de se obter as coordenadas de referência. Na segunda campanha foi realizado novamente o levantamento GNSS da rede Geodésica, a fim de verificar se houve ou não a movimentação dos pilares utilizados como referência, bem como o levantamento dos pontos de monitoramento para a verificação do deslocamento/estabilidade dos pontos de monitoramento. Como nesta campanha as comportas do vertedor estavam abertas devido à manutenção nas turbinas da PCH (Pequena Central Hidrelétrica), utilizada para manter a vazão sanitária do rio Tibagi, suspeitou-se que o fato poderia influenciar nas coordenadas obtidas, haja vista que estas apresentaram valores inesperados. Logo, após encerrar a manutenção das turbinas, a fim de aproveitar que o nível de água no reservatório fosse praticamente o mesmo que a campanha anterior, realizou-se uma terceira campanha de levantamento com as comportas fechadas para avaliar a influência ou não deste fenômeno. A Tabela 1 apresenta as características de cada campanha de monitoramento.

Tabela 1 – Características das campanhas.

Campanha	Vertedor	Levantamento	Nível de água
Primeira	Fechado	GNSS e irradiação	633,43m
Segunda	Aberto	GNSS e irradiação	628,87m
Terceira	Fechado	Irradiação	628,52m
Montante	Fechado	Irradiação	Não observado

Fonte: Os autores (2021).

Com relação a campanha de monitoramento à montante, foi realizado posteriormente somente uma campanha pois o objetivo era comparar as coordenadas obtidas utilizando pontos da rede geodésica de referência diferentes, localizados na margem direita, esquerda à montante e sobre a barragem.

Para o levantamento dos pontos de monitoramento à jusante no corpo da barragem, a estação total robótica foi instalada e nivelada sobre o pilar PG03 e com um refletor instalado no dispositivo de centragem forçada CG01 realizou-se a orientação da estação total. Para tal, utilizou-se as coordenadas obtidas através do GNSS, transformadas para o sistema da barragem (SB). Com a orientação concluída, realizou-se oito séries de medição de todos os prismas localizados à jusante no corpo da barragem conforme mostra a Figura 6.

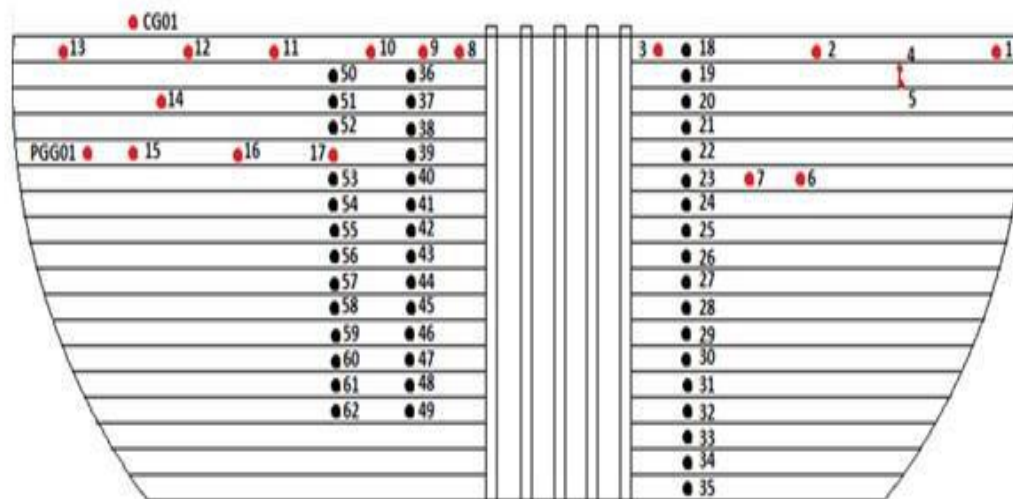


Figura 6 – Localização dos prismas no corpo da barragem.

Fonte: Os autores (2021).

De forma análoga, foram determinadas as coordenadas de pontos de monitoramento materializados à montante na barragem. Na Figura 7 observa-se os croquis das visadas a partir dos pontos PG01, PG02, CG01 e CG02.

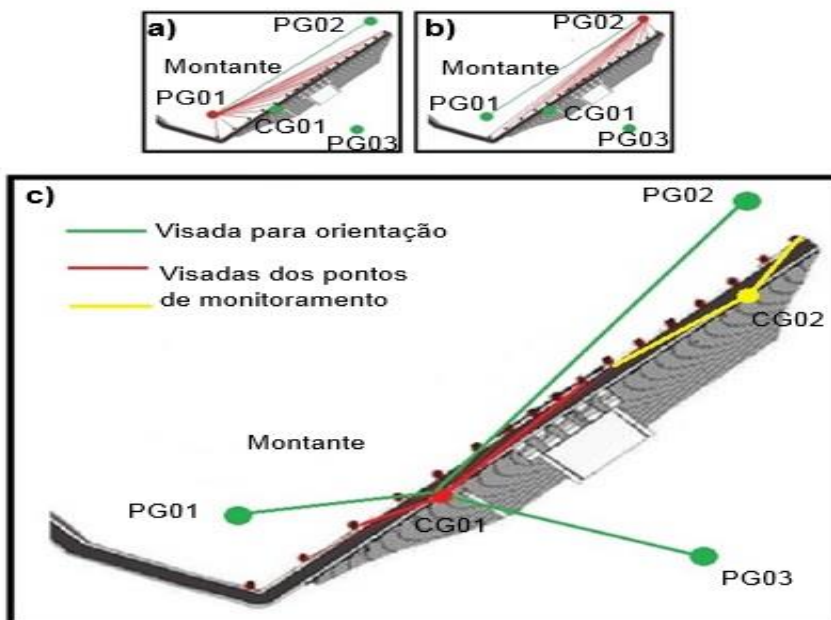


Figura 7 – Indicação das linhas de visada.
Fonte: Os autores (2021).

Como as visadas realizadas sobre o lago sofrem influência da alteração dos parâmetros ambientais (temperatura e pressão atmosférica) entre a água e o ar, que influenciam na medida da distância e no cálculo das coordenadas a partir dos pontos sob influência, PG01 (Figura 7-a) e PG02 (Figura 7-b). Para diminuir esta influência, as mesmas coordenadas foram determinadas a partir de dois pontos fora da influência da refração da água, os pontos CG01 e CG02 (Figura 7-c), que se situam na crista da barragem e as visadas a partir deles são realizadas sobre a pista de rolamento.

Após orientar a estação total de acordo com cada marco ocupado, efetuou-se a pontaria nos pontos de monitoramento. Na Figura 8 observa-se o prisma em MSU02 e a estação total no marco geodésico PG01.

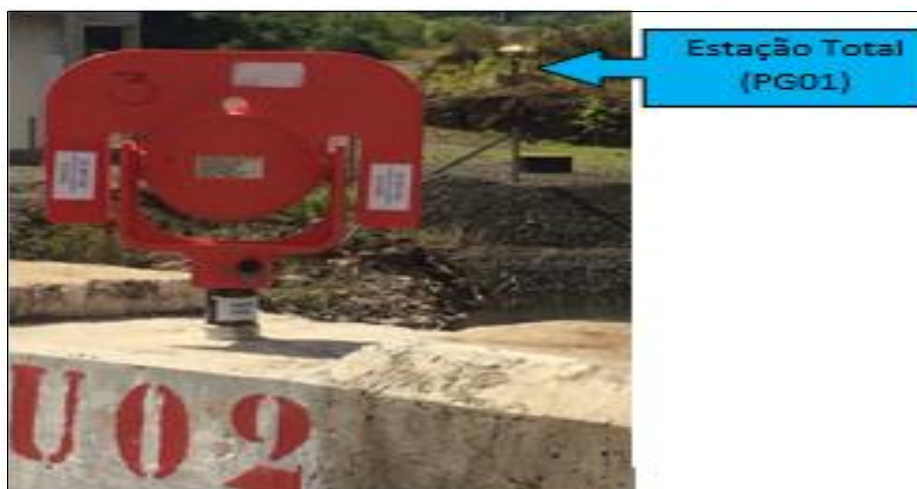


Figura 8 – Ponto de monitoramento à montante. Fonte: Os autores (2021).

A correção de cada medida de distância foi realizada com a utilização dos parâmetros ambientais (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar).

3. Resultados e discussão

O valor das coordenadas dos pilares da rede geodésica de referência no sistema da barragem obtidas na primeira e na segunda campanha de monitoramento, juntamente com o respectivo desvio padrão, são mostradas nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Valor das coordenadas obtidas da Rede Geodésica de Referência na primeira campanha.

Pilar	XB (m)	σXB (mm)	YB (m)	σYB (mm)	ZB (m)	σZB (mm)
CG01	668,645	0	207,438	0	0,327	1
CG02	352,486	0	207,069	0	0,244	1
PG01	903,835	0	73,731	0	4,644	1
PG02	149,125	0	142,373	0	15,998	1
PG03	653,587	0	453,845	0	-50,052	1

Fonte: Os autores (2021).

Tabela 3 – Valor das coordenadas obtidas da Rede Geodésica de Referência na segunda campanha.

Pilar	XB (m)	σXB (mm)	YB (m)	σYB (mm)	ZB (m)	σZB (mm)
CG01	668,645	0	207,437	0	0,328	1
CG02	352,485	0	207,068	0	0,242	1
PG01	903,836	0	73,731	0	4,642	1
PG02	149,123	0	142,373	0	15,998	1
PG03	653,587	0	453,845	0	-50,052	1

Fonte: Os autores (2021).

A diferença dos valores das coordenadas obtidas na primeira e na segunda campanha de monitoramento da Rede Geodésica de Referência são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Diferença das coordenadas da Rede Geodésica de Referência entre as campanhas.

Pilar	ΔXB (mm)	σXB (mm)	ΔYB (mm)	σYB (mm)	ΔZB (mm)	σZB (mm)
CG01	0	0	1	0	- 1	1
CG02	1	0	1	0	2	1
PG01	-1	0	0	0	2	1
PG02	2	0	0	0	0	1
PG03	0	0	0	0	0	1

Fonte: Os autores (2021).

Considerando que não houve variações significativas, dentro de um nível de significância de 95%, das coordenadas obtidas em épocas diferentes, as coordenadas da Rede Geodésica de Referência foram utilizadas para a orientação do levantamento no corpo da barragem. Na terceira campanha e na campanha à montante foram consideradas as coordenadas da rede geodésica da segunda campanha haja vista que ambas foram realizadas somente 18 dias após a segunda campanha. A Tabela 5 apresenta a média da diferença das coordenadas entre a primeira e a segunda campanha de monitoramento dos pontos à jusante.

Tabela 5 – Diferença de coordenadas entre a primeira e a segunda campanha.

Diferença entre primeira - segunda campanha					
ΔXB (mm)	σXB (mm)	ΔYB (mm)	σYB (mm)	ΔZB (mm)	σZB (mm)
-4	1	-5	2	5	1

Fonte: Os autores (2021).

Comparando a primeira campanha com a segunda, percebe-se variações no eixo XB inesperados, onde a diferença de coordenadas em XB resultou em um valor médio de $-0,004 \pm 0,001m$, indicando possíveis deslocamentos laterais em todos os pontos de monitoramento. Como em barragens quase não há forças laterais atuantes agindo na estrutura, para analisar se houve um possível deslocamento lateral, foi feita outra campanha de levantamento para comprovação de tal hipótese. Vale lembrar também que na primeira campanha as comportas do vertedor estavam fechadas e na segunda campanha as comportas do vertedor estavam abertas, com isso suspeitou-se que a água vertida poderia influenciar nos resultados do monitoramento geodésico de barragem. Realizou-se então mais uma campanha de monitoramento com as comportas fechadas, logo após fecharem as comportas devido à manutenção nas turbinas para aproveitar o mesmo nível de água que a campanha anterior.

A Tabela 6 apresenta a diferença da média das coordenadas encontradas entre a segunda e a terceira campanha de monitoramento, sendo que a terceira campanha foi realizada 18 dias após a segunda campanha e nas duas campanhas não houve diferença significativa no nível de água do reservatório.

Tabela 6 – Diferença de coordenadas entre a segunda e a terceira campanha.

Diferença entre segunda - terceira campanha					
ΔXB (mm)	σXB (mm)	ΔYB (mm)	σYB (mm)	ΔZB (mm)	σZB (mm)
3	1	2	2	-5	1

Fonte: Os autores (2021).

Como os deslocamentos em XB continuaram a apresentar valores inesperados na segunda – terceira campanha com um valor médio de $0,003 \pm 0,001m$, mesmo com um intervalo de tempo mínimo de 18 dias e com uma diferença do nível de água do reservatório insignificante de 0,35m, analisou-se o comportamento das coordenadas entre as campanhas com as mesmas condições, ou seja, as campanhas com as comportas fechadas (primeira – terceira).

A Tabela 7 apresenta a diferença da média das coordenadas encontradas entre a primeira e a terceira campanha de monitoramento, analisando-se as campanhas que estavam com as comportas fechadas.

Tabela 7 – Diferença de coordenadas entre a primeira e a terceira campanha.

Diferença entre primeira - terceira campanha					
ΔXB (mm)	σXB (mm)	ΔYB (mm)	σYB (mm)	ΔZB (mm)	σZB (mm)
-1	1	-3	2	0	1

Fonte: Os autores (2021).

Analisando os resultados das campanhas com as comportas fechadas, as diferenças de coordenadas em XB apresentou valor médio de $-0,001 \pm 0,001\text{m}$, verifica-se, portanto, que não há indicação de movimento lateral, dentro de um nível de significância de 95% e considerando a precisão do equipamento utilizado.

Já em YB, a diferença das coordenadas encontradas entre as campanhas variou significativamente, sendo que a diferença encontrada na primeira – segunda campanha (comportas abertas) o valor encontrado foi de $-0,005 \pm 0,002\text{m}$, na segunda – terceira campanha o valor foi de $+0,002 \pm 0,002\text{m}$ (comportas abertas) e na primeira – terceira (comportas fechadas) o valor foi de $-0,003 \pm 0,002\text{m}$. Como apresentado no texto, o eixo YB está no sentido do fluxo do rio, consequentemente, como na segunda e na terceira campanha o nível do reservatório baixou aproximadamente 5m em relação a primeira campanha, as forças e a pressão contra a barragem diminuiram, podendo ser uma possível causa da variação negativa encontrada no valor das diferenças das coordenadas. Já quando analisa-se as campanhas que não tiveram uma diferença expressiva no nível de água do reservatório (segunda – terceira campanha), o resultado encontrado da diferença de coordenadas foi de $0,002 \pm 0,002$, não podendo-se afirmar que houve movimentação dos pontos considerando a precisão do equipamento.

Em ZB o comportamento foi praticamente o mesmo que em XB, pois na campanha com as comportas abertas o valor médio foi de $0,005 \pm 0,001\text{m}$ e na campanha com as comportas fechadas o valor médio foi de $0,000 \pm 0,001\text{m}$.

A partir destes resultados pode-se verificar que o fato das comportas estarem abertas, a água vertida pode influenciar na obtenção das coordenadas dos pontos à jusante e consequentemente no resultado do monitoramento geodésico da barragem.

Para o estudo das coordenadas dos pontos à montante, optou-se por utilizar apenas uma campanha de monitoramento e analisar as diferenças entre as coordenadas dos pontos de monitoramento, obtidas através de diferentes pilares da rede geodésica (PG01, PG02, CG01 e CG02) buscando verificar a existência da influência da refração causada pelo reservatório. A Tabela 8 contém as diferenças entre as coordenadas obtidas a partir do PG01 e do PG02, onde as medições estavam sob a influência do reservatório.

Tabela 8 – Diferença de coordenadas dos pilares de montante PG01 e PG02.

Pontos	XB (mm)	σ_{XB} (mm)	YB (mm)	σ_{YB} (mm)	ZB (mm)	σ_{ZB} (mm)
MSU01	-1	0	7	2	0	1
MSU02	0	1	8	2	6	1
MSU03	1	1	7	1	8	2
MSU04	2	0	7	1	12	2
MSU05	0	0	7	1	16	1
MSU06	2	1	9	1	22	1
MSU07	0	0	8	1	28	1
MSU08	0	1	10	2	30	3
MSU09	0	1	9	2	35	1
MSU10	0	0	8	1	37	1

Fonte: Os autores (2021).

Nas Tabelas 9 e 10, é possível observar as diferenças entre as coordenadas obtidas a partir dos pilares PG01 e PG02, respectivamente, e os dispositivos de centragem forçada CG01 e CG02, que não estão sob a influência do reservatório. Cabe salientar que do marco CG01 é possível observar somente os pontos de MSU01 ao MSU 07 e do marco CG02 observa-se os demais pontos de monitoramento à montante. Como não é possível observar todos os pontos de monitoramento a partir de CG01 e CG02, unificou-se os resultados das diferenças encontradas nas tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Diferença de coordenadas o pilar de montante PG01 em relação aos CG01 e CG02.

Pontos	XB (mm)	σ XB (mm)	YB (mm)	σ YB (mm)	ZB (mm)	σZB (mm)
MSU01	-2	0	16	1	110	1
MSU02	-3	0	19	1	108	2
MSU03	-1	0	15	1	114	1
MSU04	-1	0	13	1	115	1
MSU05	-2	0	12	0	118	1
MSU06	-1	0	10	0	120	0
MSU07	-3	0	10	1	120	1
MSU08	-7	0	4	2	333	1
MSU09	-6	1	3	1	340	1
MSU10	-7	1	4	2	341	1

Fonte: Os autores (2021).

Tabela 10 – Diferença de coordenadas o pilar de montante PG02 em relação aos CG01 e CG02.

Pontos	XB (mm)	σ XB (mm)	YB (mm)	σ YB (mm)	ZB (mm)	σZB (mm)
MSU01	-1	0	9	2	110	2
MSU02	-3	0	10	2	102	3
MSU03	-2	0	7	1	105	2
MSU04	-2	0	6	1	104	2
MSU05	-2	0	5	1	102	1
MSU06	-3	0	1	1	98	1
MSU07	-7	0	-4	2	305	1
MSU08	-6	0	-7	2	310	2
MSU09	-7	0	-5	1	306	1
MSU10	-7	0	-5	1	305	1

Fonte: Os autores (2021).

Considerando os resultados das tabelas 8, 9 e 10, juntamente com a propagação de covariância para a obtenção das coordenadas dos pontos de monitoramento à montante, percebe-se que em cada marco utilizado para realizar a medição, há uma diferença significativa no valor das coordenadas obtidas nos pontos de monitoramento à montante, sendo que os valores dessas diferenças de coordenadas são maiores que a influência da precisão do instrumento utilizado.

Nesta análise descarta-se a possibilidade de que estes valores indiquem a movimentação/deslocamento destes pontos visto que as medições de todos os pontos através de todos os marcos foram realizadas na mesma campanha, ou seja, foram realizadas no mesmo dia.

Com isso, constatou-se que dependendo do marco utilizado para a obtenção das coordenadas à montante, há a possibilidade de que a refração atmosférica causada pelo reservatório de água influencie no valor das coordenadas dos pontos de monitoramento à montante.

4. Considerações finais

Com relação a estabilidade da rede geodésica de referência, podemos afirmar que as diferenças entre as coordenadas obtidas em épocas diferentes, dentro de um nível de significância de 95%, são insignificantes. Em função disso, as coordenadas obtidas na primeira campanha foram utilizadas como referência para o levantamento no corpo da barragem para todas as campanhas.

Para o monitoramento dos pontos à jusante, verificou-se que os resultados entre as campanhas com o vertedor em diferentes condições (uma campanha com as comportas abertas e outra campanha com as comportas fechadas) apresentam

valores diferentes, indicando movimento lateral na barragem. Já quando se analisa as campanhas com o vertedor nas mesmas condições (ambas campanhas com as comportas fechadas), os resultados apresentam valores compatíveis com as forças exercidas na barragem, pois a diferença das coordenadas em YB indica que há uma variação no mesmo sentido do fluxo do rio, onde há uma maior influência de força e pressão aplicadas na barragem, dentro dos limites aceitáveis, devido à baixa de aproximadamente 5 metros do nível de água do reservatório entre as campanhas analisadas.

Desta forma conclui-se que durante o monitoramento geodésico de barragem à jusante, o fato da barragem estar vertendo pode interferir no valor das coordenadas obtidas e conseqüentemente no resultado do monitoramento.

Com relação ao monitoramento de montante constatou-se que na obtenção das coordenadas a partir da margem esquerda (PG02), margem direita (PG01) ou sobre a crista da barragem (CG01 e CG02), os resultados são diferentes dependendo do marco utilizado para realizar a medição. Através desta constatação iniciou-se uma pesquisa, sendo conduzida em uma tese de doutorado na Universidade Federal do Paraná para avaliar a influência do coeficiente de refração em função das características e do tamanho da área superficial de água do reservatório, no monitoramento geodésico de barragem.

Analisando os resultados obtidos, recomenda-se que o resultado do monitoramento seja realizado através dos pontos engastados no paramento da barragem à jusante para evitar a influência da refração da água do reservatório e que as campanhas de monitoramento sejam realizadas com o vertedor fechado. Com relação ao monitoramento à montante recomenda-se muito cuidado com a modelagem da refração lateral para minimizar a distorção das coordenadas horizontais (XB e YB). Já para a determinação da coordenada vertical (ZB), também denominado de recalque, recomenda-se a utilização da técnica de nivelamento geométrico de primeira ordem, método das visadas iguais que, quando utilizado de maneira correta minimiza efeitos da refração, da curvatura da terra e da colimação vertical do instrumento.

Referências

- ANA. Agência Nacional de Águas. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/cadastros/barragens/>. Acesso em: 20/10/2018
- CHEN, X.; HUANG, T. LIU L. A; SHEN Y. *Application of GeoMos in automatic monitoring of the protected area of subway*. p. 36-51. Master of Science Thesis. School of Earth Sciences and Engineering, Hehai University. China, 2013.
- Chrzanowski, A.; Szostak-Chrzanowski, A. Deformation monitoring surveys – Old problems and new solutions. *Journal of Technical Sciences*, v. 21, n. 3, p. 47-60, 2009.
- DA CRUZ, W. *Integração de dados de monitoramento de estruturas antrópicas. Estudo de caso: UHE Mauá*. p. 74-91. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2015.
- IGS. International GNSS Service. Disponível em: <http://igsceb.jpl.nasa.gov>. Acesso em: 15/10/2018
- JERKE, A. *Análise do monitoramento geodésico da barragem da Usina Hidrelétrica Mauá com equipamentos de diferentes precisões e diferentes softwares de processamento*. 117f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2019.
- Jingzhan, Z. Application of TCA2003 Total Station to surface deformation observation for Ertan Dam. *Academic Journal Eletronic*, v. 63, n. 45, p. 34-38, 2002.
- LACTEC. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Disponível em: <http://www.lactec.org.br>. Acesso em: 15/10/2018.
- NGS. National Geodetic Survey. Disponível em: <http://www.ngs.noaa.gov>. Acesso em: 15/10/2018.
- SIGUEL, A. R. *Monitoramento da barragem da UHE Mauá utilizando irradiação tridimensional*. 104f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2013.

Silveira, J. F. A. . *Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e enrocamento*. São Paulo, Brasil: Oficina de textos, 2006. p 33.

Wenchun, Z. ; Zhengyuan, X. Research and Application of Modern Geomatics Technology in the Deformation Monitoring of Metro Tunnel. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, v. 40, n. 12, p. 2257-2265, 2018.