

Monitoramento geodésico da barragem da Quiminha

Geodesic monitoring of the Quiminha dam

António Alves Teixeira de Carvalho¹, Ilídio Capobo Culevala²

¹Faculdade de Ciências, Universidade Agostinho Neto, Departamento de Engenharia Geográfica, Campus da Universidade Agostinho Neto, Número de contribuinte 7101005232, Rua Principal do Camama e Rua do Estádio 11 de Novembro, Distrito Cidade Universitária, Luanda, Angola, Doutorado em Ciências Técnicas (Geodesia Espacial), email: alvesprofessor2015@gmail.com.

²Laboratório de Engenharia de Angola, Rua do Laboratório de Engenharia de Angola, Distrito da Maianga, Luanda, Angola, Engenheiro Geógrafo, email: ilidio.cap@gmail.com.

CITAR COMO:

Carvalho, A. a. T. D. y I. C. Culevala Monitoramento geodésico da barragem da Quiminha. Revista Angolana de Geociências, 2020, 1(1), p. 39-49

INFORMAÇÃO ADICIONAL:

Recebido: 20/04/2020

Aceite: 2/06/2020

*Autor correspondente:

Atónio Alves Teixeira de Carvalho (e-mail: alvesprofessor2015@gmail.com)

Licença: CC BY-NC

Copyright: Centro de Investigação em Ciências Geológicas Aplicadas

Conflitos de interesses:

Os autores declaram que não há conflitos de interesses

Resumo: As barragens são obras de engenharia que geralmente estão associadas a um elevado potencial de risco devido à possibilidade de eventuais colapsos, com consequências catastróficas para as estruturas da própria barragem, ao meio ambiente, causando destruição da fauna, flora e principalmente colocando em risco vidas humanas. Com o objectivo de verificar a estabilidade de pontos previamente seleccionados e materializados à montante e à jusante da barragem da Quiminha, localizada à 80 km a nordeste de Luanda e à 20 Km de Catete, aplicou-se o método de monitoramento geodésico. Os procedimentos metodológicos deste trabalho basearam-se no planeamento e colecta dos dados de sete épocas (campanhas) distintas, seguidos do seu processamento e ajustamento. Neste contexto, foram aplicados diferentes métodos de levantamentos, tais como: trilateração, irradiação e nivelamento geométrico, cada um deles com um propósito específico dentro do projecto de monitoramento da estrutura. Determinadas e ajustadas as coordenadas dos pontos do objecto, obtidas a partir da rede de referência, foram comparadas entre as combinações das diferentes campanhas com a aplicação do teste de hipóteses. Os resultados demonstraram que a estrutura da barragem da Quiminha registou deslocamentos inferior a 6 mm e não apresenta risco aos moradores localizados à jusante.

Palavras-chave: Barragem; Geodesia; Monitoramento; Nivelamento.

Abstract: Electric Dams are engineering structures with an inherent elevated risk due to possible collapse, which can have catastrophic consequences for the structure itself as well as the surrounding environment. It is not uncommon for collapsed dams to destroy of fauna, flora, and above all endangering human lives. Dams are monitored using geotechnical and/or geodesic methods. This study presents work developed towards the geodesic monitoring of Quiminha Dam, located some 80 Kilometers northeast from Luanda, and about 20 Kilometers from Catete. The methodological procedures of this work were based on planning and collecting data from seven different periods (campaigns), followed by their processing and adjustment. For such, applied different methods of surveying such as trilateration, irradiation, and geometric leveling. Each one of these methods was used with a specific goal in monitoring the dam. Determined and adjusted the coordinates of the points of the object, obtained from the reference network, were compared between the combinations of the different campaigns with the application of the hypothesis test. The results showed that the structure of the Quiminha dam registered displacements of less than 6 mm and presents no risk to residents located downstream.

Keywords: Dam; Geodesy; Monitoring; Leveling.

INTRODUÇÃO

Os estudos do comportamento de obras de engenharia possuem relevância nos dias actuais, pois tem como finalidade a observação destes empreendimentos. Neste contexto, estão incluídas as barragens, obras que geralmente são associadas a um elevado potencial de risco devido à possibilidade de um eventual colapso, desta forma, toda barragem deve ser instrumentada de acordo com seu porte e riscos associados.

A construção e exploração de barragens estão relacionadas com importantes benefícios económicos, pois a energia gerada é um dos factores determinantes a diversas acções humanas. Devido a este facto, em muitos países existem legislações que regulamentam o controlo e a segurança de barragens com base em regras específicas (Castro e Henriques 2008). Em Angola, segundo o Laboratório de Engenharia de Angola (LEA), deve ser previsto um sistema de instrumentação com vista a auscultação do comportamento dessas estruturas para as fases de construção e de exploração (Júlio Fonseca, 2018).

Com o objectivo de verificar a estabilidade de pontos previamente seleccionados e materializados à montante e à jusante da barragem da Quiminha, localizada à 80 km a nordeste de Luanda e à 20 Km de Catete, aplicou-se o método de monitoramento geodésico. Neste contexto, o sistema de observação utilizado na monitorização dos deslocamentos absolutos de pontos, apoiou-se em redes geodésicas de controlo planimétricos e altimétricos independentes, implantadas fora da estrutura que servirão como referencial absoluto para medições das coordenadas dos alvos.

Os deslocamentos absolutos dos alvos implantados na barragem, são obtidos da análise do conjunto de coordenadas e cotas obtidas de diferentes campanhas de observações, indicando se houve ou não movimentação dos pontos previamente seleccionados.

A metodologia adoptada neste artigo pode servir como referência ao monitoramento geodésico a outros empreendimentos. Os dados obtidos permitem a formação de um conjunto adicional de elementos que servirão de gerenciamento e controlo de segurança de barragens.

MONITORAMENTO DE BARRAGENS

A técnica de monitoramento de barragens utilizadas neste trabalho foram as observações geodésicas, pois fornecem directamente informações sobre o deslocamento espaciais da fundação ou recalque devido a acção de cargas e a percolação da água do reservatório através das fundações (CONSULGEO, 2005).

Os assentamentos verticais e os movimentos horizontais das barragens são os principais parâmetros de diagnósticos associados a segurança da estrutura. Por esta razão o monitoramento geodésico contínuo de barragens, o estudo dos métodos de medições e sua modernização resolverão o problema de obtenção das informações correctas sobre o estado do objecto e garantirá a confiabilidade operacional da barragem (Borisovich e Mixeleve, 2015).

MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DOS ASSENTAMENTOS VERTICAIS

Os principais métodos de monitoramento geodésico para a determinação dos assentamentos verticais de barragens são o nivelamento geométrico e trigonométrico (Gorelove 2006). No nivelamento geométrico o mais frequentemente utilizado é o de curtas visadas. A precisão e a rapidez na obtenção dos desníveis entre as estações fazem com que este método se torne bastante eficaz nas determinações dos assentamentos verticais.

No nivelamento geométrico de alta precisão com curtas visadas, é utilizado níveis em que a sua calagem é realizada com o auxílio de níveis de bolha bi-partida ou níveis automáticos que possuem um sistema de horizontalização automática da linha de visada (Wolf, Guilani 2002). As miras utilizadas neste tipo de nivelamento são as de invar, de fibra de vidro ou de madeira seca todas com um coeficiente de dilatação linear bastante baixa, ou as miras de códigos de barra para os níveis digitais.

As observações das deformações verticais são executadas por ciclos (épocas de observação) em função da cota de um marco de deformação em relação a um ponto pertencente a rede de nivelamento e considerado como ponto de apoio. Todos os ciclos de observação do nivelamento geométrico de alta precisão de visadas curtas deverão ser executados com o mesmo esquema de medições. A estação deverá ser assinalada e deverá estar ao meio das distâncias entre os marcos a determinar os desníveis. Em cada ciclo de observação deve-se cumprir os seguintes requisitos: a) mesmos instrumentos; b) as miras devem ser numeradas e colocadas nos mesmos marcos durante o ciclo ou época de observação.

Na observação dos assentamentos verticais a precisão do nivelamento é caracterizado pelo erro médio quadrático m_n na determinação dos desníveis na estação. O erro de determinação do assentamento do marco i é determinado pela expressão: $m_{\Delta s_i} = m_n \sqrt{2Q_{Hij}}$; $m_{\Delta s_{ij}} = m_n \sqrt{2Q_{Hij}}$ (1) de onde Q_{Hij} - peso inverso de determinação do assentamento na marcha ou na rede de nivelamento; Q_{Hij} - peso inverso dos desníveis entre os marcos i e j . A precisão de determinação dos assentamentos verticais é garantida pelas normas das deformações de estruturas (Chexovtsove, 2009), de nivelamento de I, II e III classes, diferentes as normas das redes de nivelamento estatal. As características técnicas estão indicadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características técnicas das redes de nivelamento de determinação dos assentamentos verticais.

Fonte: Chexovtsove 2009

Classe de Nivelamento	Distancia estação-mira (m)	m_{hi}/km (mm)	m_{hij} (mm)	Erro de fecho (mm)
I	25	0,50	0,16	$3\sqrt{L}$ (KM)
II	30	0,84	0,42	$5\sqrt{L}$ (KM)
III	40	1,68	0,65	$10\sqrt{L}$ (KM)

L é o perímetro da marcha ou polígono do nivelamento expresso em quilómetros. Para a escolha da classe do nivelamento, calcula-se a grandeza:

$$m_h = \frac{m_{si}}{\sqrt{2Q_{Hi}}}; m_h = \frac{m_{\Delta sij}}{\sqrt{2Q_{Hij}}} \quad (2),$$

e compara-se com os dados do m_{hi} ou m_{hij} , apresentados na tabela 1. O cálculo do peso inverso Q_{Hi} ou Q_{Hij} é feito pelo método dos mínimos quadrados (M.M.Q.). Caso o erro, calculado pela fórmula (2), seja inferior ao exigido no nivelamento de primeira classe ($m_{hij} < 0,16$ mm), surge a necessidade de se executar uma técnica específica de nivelamento, de formas a reduzir a influência das diferentes fontes de erros. Esta técnica especial foi desenvolvida pela Universidade de Geodesia e Cartografia de Moscovo (Borisovich, 2015) que permite medir o desnível na estação, com um erro de 0,03 mm.

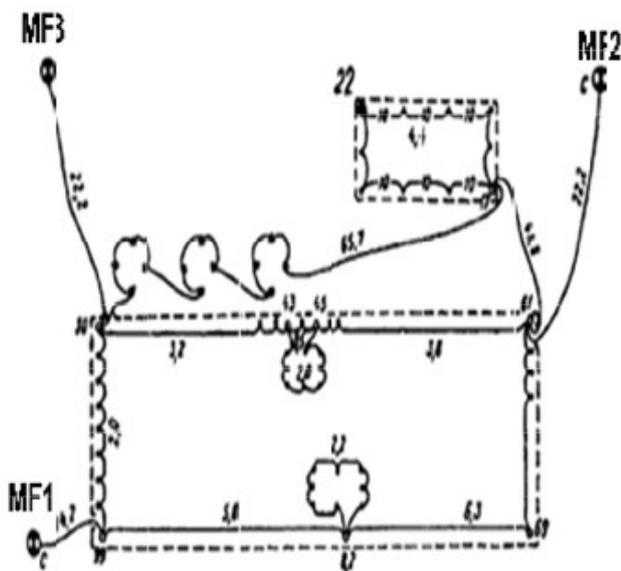


Figura 1: Esquema da rede de nivelamento para as observações de assentamento vertical de uma barragem hidrelétrica.

Fonte: (Marfenco, 2004).

As principais disposições desta técnica são as seguintes: a) utilização de níveis de alta precisão, verificados e rectificadados; b) limitação do raio de visada (estação-mira) até aos 25 metros, para diminuir o efeito da refração vertical, nos resultados das observações de nivelamento; c) utilização de níveis que garantam nitidez das imagens, não se permitindo a mudança da distância focal na estação, no momento da leitura da mira de trás e a mira de frente; d) utilização de mira de invar de nivelamento com nível de bolha de forma a diminuir a influência do erro de inclinação das miras nos resultados das medições do nivelamento; e) determinação das diferenças entre a escala métrica da mira de invar e a escala nominal no comparador de interferência antes e depois da campanha de campo (CNIIGAIAK,2000).

Na Figura 1, está ilustrado o esquema da rede de nivelamento para as observações de assentamento vertical de uma barragem hidroelétrica. Esta rede de monitoramento está composta por marcos fundamentais MF1,

MF2, MF3, que estão ligados aos marcos de controlo de assentamento do objecto como por exemplo o marco 22 na sala de máquinas.

Observe a figura 1, o ponto nodal 22 do esquema da rede de nivelamento, do resultado da avaliação de precisão da rede de nivelamento obteve-se o valor do peso inverso $Q_{H22} = 2,78$. Se a precisão que se deseja determinar o assentamento for $m_{si} = 2$ mm, então na estação, a precisão que deverá ser determinado o desnível de acordo com a fórmula (2) é: $m_h = \frac{2}{\sqrt{2.78}} = 0,1601$.

Para se obter esta precisão, o programa de medições de nivelamento, que tem que, se aplicar é o de I classe de acordo com as características técnicas fornecidas pela tabela 1. O nivelamento trigonométrico, permite determinar o assentamento vertical de marcos localizados em alturas significativamente diferentes e ou em locais de difícil acesso. A precisão de determinação dos assentamentos, pode atingir a ordem de 1 a 2 mm se as visadas forem curtas (Vorochilove, 2015). De acordo com a fórmula fundamental do nivelamento trigonométrico (Borisovich e Mixeleve, 1993), pode-se deduzir que o desnível h_{ij} entre dois marcos de assentamentos verticais do objecto é determinado pela média através da fórmula:

$$h_{ij} = (S_i \cos z_i - S_j \cos z_j) + (l_i - l_j) + (v_i - v_j) + \frac{(1-k_j)S_j^2}{2R \sin^2 z_j} - \frac{(1-k_i)S_i^2}{2R \sin^2 z_i} \quad (3),$$

onde S_i, S_j - distância inclinada da estação aos respectivos marcos i e j; z_i, z_j - distancia zenital da estação nos respectivos marcos i e j; l_i, l_j - altura do instrumento ao se visar os marcos i e j; v_i, v_j - altura de visada nestes marcos; k_i, k_j - coeficiente de refração vertical; R - raio médio de curvatura da Terra.

Para que se atinja a precisão entre 1 a 2 mm exige-se observações de alta precisão não só do ângulo zenital z e a distância inclinada S mas também a determinação da altura do instrumento v, o que torna mais complexo o método de observações.

Mantendo a altura do instrumento na estação cumprir-se-á a condição. $l_j = l_i$ e se as alturas das visadas coincidirem com a altura da estação total então $v_j = v_i$. De recordar que as visadas no nivelamento trigonométrico são curtas então pode-se considerar que $k_j = k_i$ e nas condições atmosféricas mais desfavoráveis possíveis a variação do coeficiente da refração estão nos limites 0,14...0,20 (Adelmo, 2006) logo h_{ij} não excede os 0,03 mm.

Sob as condições especificadas ($l_j = l_i; v_j = v_i; k_j = k_i$) a fórmula (3) pode ser reescrita da seguinte forma: $h_{ij} = S_j \cos z_j - S_i \cos z_i$ (4), e o erro médio quadrático do desnível na estação de acordo com a diferenciação dos argumentos não correlacionados entre si (Markuze e Dmitrievich, 2016) é dada pela expressão: $m_h^2 = 2m_s^2 \cos^2 z + 2\left(\frac{S}{\rho \sin^2 z}\right)^2 m_z^2$ (5), onde S - distância medida da estação total ao marco; mS - erro médio quadrático da distância S; z- ângulo zenital medido da estação ao marco; mz - erro médio quadrático do ângulo zenital; $\rho = 206265''$.

MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DOS MOVIMENTOS HORIZONTAIS

Os requisitos de sustentabilidade da posição planimétrica no seu todo da barragem e seus elementos, assim

como as exigências técnicas de implantação, devido a sua tecnologia e característica de construção podem variar em diferentes direcções. Neste sentido a determinação dos deslocamentos horizontais pode ser feita por duas coordenadas ou apenas por uma coordenada. No primeiro caso, para coordenar o ponto observado da estrutura utiliza-se o método linear-angular e no segundo o de alinhamento.

A rede linear-angular pode ser do tipo da rede de triangulação ou de trilateração, redes combinadas, intersecção angular e linear ou poligonais.

De uma forma geral utiliza-se o método combinado de triangulação e trilateração. Nas redes combinadas medem-se todos os ângulos e alguns lados. A decisão de quais os lados e com que precisão deverá ter as medições lineares e angulares, é feita dos cálculos baseados nos requisitos de precisão da determinação das grandezas de deslocamento. Nos cálculos utilizaram-se as fórmulas para a avaliação de precisão dos deslocamentos em função dos eixos do sistema de coordenadas considerado x, y a saber:

$$m_{qx} = \mu\sqrt{2Q_x}; m_{qy} = \mu\sqrt{2Q_y} \quad (6)$$

onde μ - erro médio quadrático por unidade de peso (aqui refere-se ao erro das medições angulares ou das direcções); Q_x, Q_y - peso inverso das coordenadas dos pontos observados respectivamente nos eixos x, y .

A utilização do tipo de rede depende do carácter de construção, sua forma geométrica, a precisão exigida, condições organizativas de medições e outros factores. Por exemplo as intersecções angulares ou lineares, utilizam-se para a determinação das deformações dos pontos inacessíveis da barragem ou estruturas, a triangulação e a poligonização para estruturas com a forma curvilínea. Em muitos casos as redes combinadas, a triangulação e a trilateração servem para a determinação da estabilidade dos pontos de apoio (marcos fundamentais) e as coordenadas dos pontos auxiliares, dos quais pelo método de intersecção ou de poligonização se determinam os assentamentos dos pontos da barragem ou estruturas.

MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAIS UTILIZADOS

Para realização das campanhas de observação da rede geodésica de monitoramento, foram utilizados os seguintes materiais disponibilizados pelo Laboratório de Engenharia de Angola (LEA): a) 01 (um) nível óptico-mecânico modelo NA2, da marca Leica acoplado com um micrómetro óptico e um micrómetro GMP3 o qual permite efectuar leituras directas com precisão até 0,01 mm; b) 01 (uma) estação total modelo TM30, da marca Leica, oferece medições angulares precisas de 0,5 "a 1", as distâncias podem ser medidas com uma precisão de 0,6 mm + 1 ppm (partes por milhão) para prismas ópticos; c) 02 (duas) miras com a escala em invar com cerca de dois metros de comprimento, acoplada com dois níveis esférico; d) 01 (um) tripé de madeira; e) 03 (três) reflectores de alta precisão modelo GPHIP da marca Leica, com precisão de centragem de 0,3mm; f) 20 (vinte) reflectores de precisão modelo

GPR121 da marca Leica; e com uma precisão de centragem forçada de 1,0 mm. Os instrumentos foram verificados e calibrados pela empresa SERTOPO em 20 de Outubro de 2014.

MÉTODOS

Descrição Geral da Área de Estudo

A estrutura utilizada para estudo foi a barragem da Quiminha, localizada a 80 km a nordeste de Luanda e a 20 Km de Catete (Figura 2).

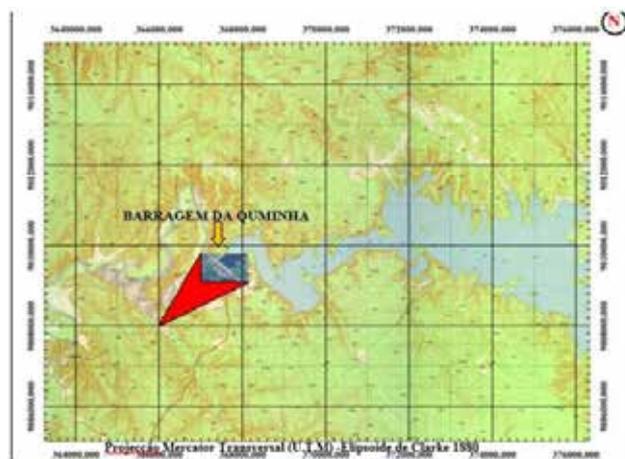


Figura 2: Localização Geográfica da Barragem da Quiminha.

Fonte: IGCA 1982

A barragem da Quiminha é uma barragem de terra, com a altura máxima de cerca de 40 metros e uma capacidade de armazenamento de 1560.106 metros cúbicos, equivalente à cota máxima do nível de água, que é de 51,80 metros (CONSULGEO,2005). A construção da barragem da Quiminha ficou concluída em 1975 e a água deste reservatório é utilizada para irrigação, amortecimento dos caudais de cheias para protecção contra inundações de zonas agrícolas, e para abastecimento doméstico.

Foi concebida e dimensionada para produção de energia, tendo sido previsto no projecto a possibilidade de introdução de uma central hidreléctrica para uma potência instalada de 16 000 KVA.

Sistema de Monitoramento Geodésico da Barragem da Quiminha

O sistema de observação utilizado na monitorização dos deslocamentos absolutos de pontos implantados à jusante e à montante da barragem da Quiminha baseia-se em redes de controlo planimétricos e altimétricos, apoiados em quadros de referência. O sistema foi implantado em 2008 pela empresa Tecnasol, após a conclusão dos trabalhos de impermeabilização aplicadas para colmatar a percolação instalada nos maciços da barragem, em substituição do sistema antigo implantado na fase de enchimento do reservatório.

Rede Planimétrica

A rede planimétrica é constituída por quatro marcos de referência projectados como fixos (PT1, PT2, PT3 e PT4) implantados fora da zona sujeita as influências das deformações inerentes

ao comportamento estrutural da barragem, materializados por pilares de betão e o topo do pilar possui um sistema com centragem forçada para o estacionamento da base do aparelho e dos reflectores de alta precisão, a partir dos quais são intersectados oito (8) pontos objectos implantados no talude à montante e vinte e um (21) pontos implantados no talude à jusante, todos materializados por betão e com sistema de centragem forçada para colocação dos reflectores.

Rede Altimétrica

Para determinação das cotas dos pontos de monitoramento da rede altimétrica empregou-se o método de nivelamento geométrico de precisão. A linha de nivelamento geométrico de precisão, é constituída por cinco pontos de referência (PFN1, PFN1, PFNM2, PFNM3, PFNM4) e dezasseis pontos objectos implantados sobre a estrutura monitorada. Os pontos de referência são materializados por tacos de latão, com caixa de proteção chumbadas em pequenos maciços de betão, teoricamente solidários com afloramento rochoso e afastados da zona de influência da barragem.

LEVANTAMENTO DOS PONTOS DA REDE DE MONITORAMENTO

As campanhas efectuadas na barragem da Quiminha

As campanhas de medições geodésicas na barragem da Quiminha tiveram início em Março de 2015. Até a data, foram realizadas sete campanhas de medições, duas em 2015, uma em 2016, uma em 2017 e três em 2018.

Na tabela 2, se apresenta a listagem das campanhas de medições realizadas, indicando a codificação alfanumérica das campanhas, a data em que foram realizadas as campanhas, o nível e o volume de água na albufeira. A campanha realizada em Junho de 2016 é tomada como referência para o cálculo dos deslocamentos horizontais e verticais dos pontos objectos da rede de monitoramento.

Tabela 2. Campanhas de medições efectuada na barragem

Fonte: Carvalho A. et I.C. 2015-2018

Nível e volume de água na albufeira durante as campanhas de observação			
Codificação	Data - Campanha	Nível de Água (metros)	Volume de Água (m ³)
C1	18.03.2015	37,76	480*10 ⁶
C2	26.08.2015	37,18	473*10 ⁶
C3	26.06.2016	46,26	1050*10 ⁶
C4	22.09.2017	44,27	870*10 ⁶
C5	26.02.2018	44,82	880*10 ⁶
C6	27.05.2018	45,30	919*10 ⁶
C7	15.09.2018	43,42	745*10 ⁶

Verificação da estabilidade dos marcos da rede de referência

Os pilares de estacionamento da rede geodésica, apesar de localizados (em princípio) fora da zona sujeita a influência das deformações inerentes ao comportamento estrutural da barragem, devem ser controlados, pois, os deslocamentos absolutos dos pontos objectos são determinados a partir desta rede que se presume ser estável.

A estabilidade dos marcos de referência da rede de monitoramento implantados à montante e à jusante da barragem da Quiminha foi verificada, medindo a variação das distâncias entre ambos, em duas épocas distintas (Agosto de 2015 e Março de 2016). Para as medições das distâncias, aplicou-se o método de trilateração, com o auxílio de uma estação total TM30 e um reflector GPHIP de alta precisão.

As distâncias entre os pontos foram medidas em ambos os sentidos em diferentes períodos do dia formando assim séries de observações (Figura 3).

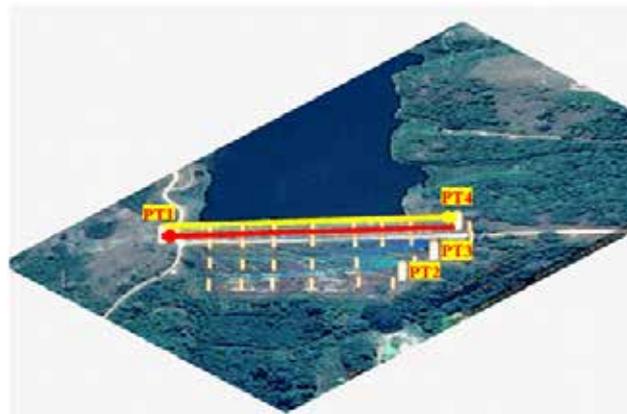


Figura 3: Medição da distancia entre os marcos de referência (PT1-PT4)

Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2015)

Durante a realização das séries de observações, foram adoptados dois critérios para aceitação das medições efectuadas.

O primeiro foi o critério para verificação das distâncias medidas em ambos os sentidos. Para o efeito, definiu-se que a tolerância para o erro médio quadratico dos valores das distâncias medidas em ambos os sentidos, seria inferior à precisão nominal do equipamento (0,6 mm + 1 ppm). As observações que excederam esta tolerância foram retiradas da amostra e novas observações foram realizadas.

Como segundo critério, definiu-se que durante o cálculo das médias das séries de observação, a tolerância para os valores dos resíduos calculados seria de $1,65 \cdot \sigma$ (erro tolerável). Os valores dos resíduos calculados que excederam esta tolerância foram descartados e nova média calculada.

Tabela 3. Probabilidade dos erros toleráveis

Fonte: Amorim, 2005

Probabilidade de rejeição	Número de desvio padrão
10%	1,65.σ
5%	1,96.σ
1%	2,58.σ
0,1%	3,29.σ

Tabela 4. Distâncias entre os pilares PT1 -PT4

Fonte: Carvalho A. et I.C. 2015

Série	Pontos observados	Distâncias (m)	Resíduos (V) (mm)	(V) ²
1ª Série	PT1-PT4	321,9457	0,18	0,03
	PT4-PT1	321,9462	-0,32	0,11
2ª Série	PT1-PT4	321,9461	-0,23	0,05
	PT4-PT1	321,9455	0,38	0,14
Agosto de 2015		Média	Soma (v)	Soma (v ²)
1ª Época		321,94588	0,00	0,33

O erro tolerável pressupõe a especificação “a priori” de um critério estatístico de rejeição. A tabela 3 mostra algumas probabilidades de erros toleráveis, baseados na curva de distribuição normal reduzida (AMORIM, 2005). A título de exemplo, é ilustrado o processamento das distâncias medidas entre os marcos de referência (PT1 e PT4).

Cálculo do desvio padrão: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,33}{4}} = 0,33\text{mm}$

Cálculo do erro de tolerância com a probabilidade de rejeição de 10%: $e = 1,65 \times \sigma \Rightarrow e = 1,65 \times 0,33\text{mm} \Rightarrow e = 0,55\text{mm}$

Cálculo do desvio padrão da média: $\sigma_M = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \Rightarrow \sigma_M = \frac{0,33}{2} \Rightarrow \sigma_M = 0,17\text{mm}$

Distancia média e precisão: $d(\text{PT1-PT4}) = 321,9459 \text{ mm} \pm 0,17 \text{ mm}$.

Examinando a tabela 4, pode se observar que não é necessário rejeitar nenhuma distância, pois, todos os resíduos ficaram abaixo do erro máximo tolerável ($e=0,55 \text{ mm}$).

Monitoramento dos Pontos da Rede Planimétrica

Para o monitoramento dos pontos da rede de controlo materializados nos taludes da jusante e montante da barragem da Quiminha, as observações foram feitas em cinco épocas distintas, nas mais diversas condições meteorológicas no período de junho de 2016 a Setembro de 2018. A campanha realizada em Junho de 2016 foi considerada como época de referência.

As coordenadas dos pontos da rede planimétrica foram determinadas com a Estação Total Leica TM30, com auxílio de prismas circulares, também da Leica.

Para determinação dos possíveis deslocamentos dos pontos objectos que compõem a rede externa de monitoramento da barragem da Quiminha empregou-se o método de ajustamento paramétrico, que é uma das aplicações do método dos mínimos quadrados (MMQ).

As incógnitas determinadas são as correções aplicadas às coordenadas provisórias dos pontos para a obtenção das coordenadas finais. No entanto, para aplicar este método, é necessário conhecer as coordenadas aproximadas dos pontos.

Para determinação das coordenadas aproximadas dos pontos objectos, utilizou-se o método de irradiação. Foi estabelecido um sistema de referência local (x, y), com o eixo y, orientado positivamente na direcção PT1-P0 e eixo x perpendicular ao eixo y, orientado positivamente em direcção à Jusante da Barragem, conforme ilustrado na figura 4.

Ao pilar da margem direita PT1 foi atribuído as coordenadas ($X_1= 400,0000 \text{ m}$; $Y_1= 400,0000 \text{ m}$) e o ponto P0 com as coordenadas ($x=400.000$; $y=400.000 + \text{dist} (\text{PT1-PO})$).

A partir desta base realizaram-se medições até aos alvos (prisma) instalados nos pilares de referência (PT2, PT3 e PT4). Determinando deste modo as coordenadas (x, y) dos respectivos pontos.

As coordenadas dos pontos objectos foram determinadas a partir dos pilares de referências (PT1, PT2, PT3 e PT4) utilizando o método de irradiação.

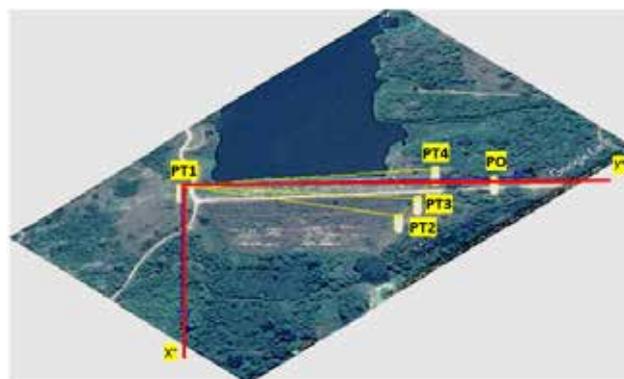


Figura 4: Sistema de coordenadas rectangulares dos marcos de referência

Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2015)

Monitoramento dos pontos da rede planimétrica a montante

Para monitorar os pontos objectos (alvos) localizados à montante da barragem, foi necessário ocupar os pilares de referência PT1 e PT4 localizados fora da zona de influência da barragem e posteriormente realizarem-se visadas nos pontos objectos (alvos) determinando-se assim as coordenadas (x, y) dos respectivos pontos.

Para uma melhor precisão, cada ponto foi observado em duas direcções (PT1 - PT2; (PT2-PT1)). Em gabinete, eliminaram-se os erros grosseiros e determinaram-se os valores médios e os desvios padrão. Os valores médios foram considerados como coordenadas aproximadas e utilizados no processo de ajustamento pelo método dos mínimos quadrados.

Monitoramento dos pontos da rede planimétrica à jusante

Para monitorar os pontos objectos (alvos) localizados à jusante da barragem foi necessário ocupar os pilares de referência PT1, PT3 e PT4 localizados fora da zona de influência da barragem, e posteriormente realizarem-se visadas nos pontos objectos (alvos) determinando-se assim as coordenadas (x, y) dos respectivos pontos.

As coordenadas de cada ponto foram determinadas em seis direcções ((PT1 - PT3) - (PT3-PT1)), ((PT1-PT4) - (PT4-PT1)), ((PT3-PT4) - (PT4-PT3)). Em gabinete eliminaram-se os erros grosseiros e determinaram-se os valores médios e os desvios padrão.

As coordenadas obtidas em campo foram ajustadas com o programa Excel, baseado no método dos mínimos quadrados.

Monitoramento dos Pontos da Rede Altimétrica

Tal como na rede planimétrica, a primeira campanha de medições na rede altimétrica (campanha de referência) também, foi realizada em Junho de 2016.

Os desníveis da linha de nivelamento geométrico foram medidos com o nível automático NA2 equipado com um micrómetro óptico GPM3 acoplado e com duas miras com escala em invar, de 2 metros de comprimento.

A partir das referências de partida e chegada materializada fora da zona sujeita a deformação, é definida a sequência de nivelamento geométrico para ocupação das miras nos pontos objectos. Em seguida, são realizadas as leituras de trás e frente (secções), tomando como referência de partida o pilar localizado na margem esquerda PFM1 de cota 25, 0000 m, passando pelos pontos objectos e pelos pontos de referência localizados na margem direita, da barragem (PFM2 PFM3 e PFM4), até a referência de chegada PFJ1. Para o efeito, foi realizado um nivelamento e um contra nivelamento.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

RESULTADOS DA REDE PLANIMÉTRICA

Nas tabelas e figuras que se seguem, apresentam-se as variações das distâncias entre os marcos de referência e as coordenadas (x, y) dos pontos objectos, determinadas em diferentes épocas de levantamento, bem como os deslocamentos nos eixos (x, y) obtidos pela diferença entre as coordenadas dos pontos objectos, determinadas em Junho de 2016 (época de referência) e as restantes campanhas de levantamento.

Rede Planimétrica de Referência

Tabela 5. Distâncias (ds) entre marcos de referência.

Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2016)

Linhas observadas	Agosto de 2015		Março de 2016		Variação Rede Planimétrica de Referência das distâncias (Δd) mm	Erro Médio Quadrático da Fórmula Geral (ε) mm
	Distância (d ₀) m	Desvio Padrão (σ) mm	Distância (ds) m	Desvio Padrão (σ) mm		
PT1-PT2	297,9772	0,18	297,977	0,18	0,2	0,25
PT1-PT3	302,3941	0,16	302,3937	0,18	0,4	0,24
PT1-PT4	321,9459	0,17	321,9456	0,20	0,3	0,26
PT2-PT3	43,3356	0,13	43,3353	0,10	0,3	0,16
PT3-PT4	55,2056	0,10	55,2054	0,11	0,2	0,15

Para caracterizar a precisão das variações das distâncias, foram calculados intervalos de erro com probabilidade de 90% (tabela 6) a partir da expressão: $r = t \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$, onde t é distribuição de student.

Tabela 6. Intervalos de erro para o nível de significância de 90%.

Fonte: Carvalho A. et I.C. 2016

Linhas Observadas	ε (mm)	(t) student	Intervalos de erro (r) para o nível de significância de 90%
PT1-PT2	0,3	6,314	± 0,9
PT1-PT3	0,2	6,314	± 0,6
PT1-PT4	0,3	6,314	± 0,9
PT2-PT3	0,2	6,314	± 0,6
PT3-PT4	0,1	6,314	± 0,3

Na tabela 7 apresentam-se as variações das distâncias (ds) dos marcos de referência e respectivos intervalos de erro com a probabilidade de 90%.

Tabela 7. Variações das distâncias (ds) entre marcos de referência

Fonte: Carvalho A. et I.C. 2015

ds(mm)	
PT1-PT2	0,2 ± 0,9
PT1-PT3	0,4 ± 0,6
PT1-PT4	0,3 ± 0,9
PT2-PT3	0,3 ± 0,6
PT3-PT4	0,2 ± 0,3

Pontos Objectos à Montante

Para determinação dos deslocamentos horizontais foi considerada como base a campanha C3 realizada em Junho de 2016. E compararam-se as campanhas C4, C5, C6 e C7.

Na tabela que se segue, esta apresentado como exemplo o deslocamento do ponto objecto PM0 localizado a montante.

Tabela 8. Deslocamento do ponto PM0 localizado no talude da montante.

Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Datas	x	Desl. (mm)	y	Desl. (mm)
26/jun/016	394,6629	0,0	735,9028	0,0
22/set/017	394,6623	-0,6	735,8990	-3,7
22/fev/018	394,6625	-0,4	735,8995	-3,3
27/mai/018	394,6642	+1,3	735,9025	-0,2
14/set/018	394,6616	-1,3	735,9030	+0,3

Na figura 5, apresentam-se os deslocamentos horizontais no eixo X dos pontos objectos registados entre as épocas realizadas, ou seja, C3 em Julho de 2016, C4 em Setembro de

2017, C5 em Fevereiro de 2018, C6 em Maio de 2018 e C7 em Setembro de 2018.

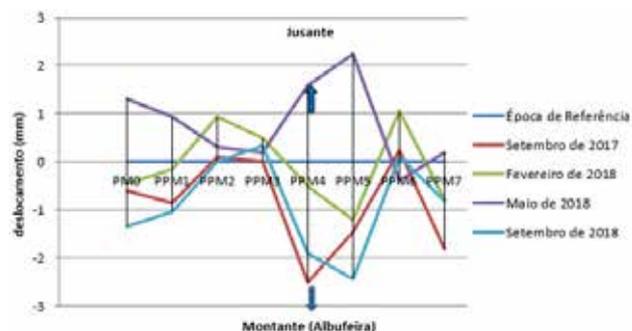


Figura 5: Evolução dos deslocamentos horizontais no eixo X dos pontos objectos localizados a montante. Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Da figura 5, pode-se verificar que, nas campanhas C4 realizadas em setembro de 2017, C5 em Fevereiro de 2018 e C7 em Setembro de 2018 os pontos, em geral, deslocaram-se em direcção à montante da barragem com um valor máximo de -2,5 mm em PM4. Já na época C6 realizada em Maio de 2018 os pontos movimentaram-se em direcção à jusante da barragem atingindo um valor máximo de + 2,3 mm em PM5.

Na figura 6, apresentam-se os deslocamentos horizontais no eixo Y dos pontos objectos localizados à montante, registados entre as épocas já realizadas, ou seja, C3 em Junho de 2016, C4 em Setembro de 2017, C5 em Fevereiro de 2018, C6 em Maio de 2018 e C7 em Setembro de 2018.

Na figura, é possível verificar que, nas épocas C4 realizadas em setembro de 2017, C5 em Fevereiro de 2018 e C7 em Setembro de 2018. Houve uma tendência dos pontos movimentarem-se em direcção à margem direita com um valor máximo de -3,7 mm em PM0. Já na época C6 realizada em Maio de 2018 constata-se que, em geral, os mesmos evoluíram em direcção à margem esquerda com um valor máximo de + 1,7 mm.

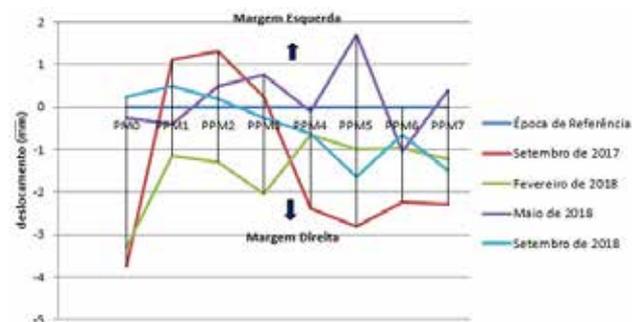


Figura 6: Evolução dos deslocamentos horizontais no eixo Y dos pontos objectos localizados a montante. Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Pontos Objectos à Jusante

A figura que se segue, apresenta o exemplo dos deslocamentos do ponto objecto localizados à jusante PJ0 entre a época C3 realizada em Junho de 2016 e as épocas C4, C5, C6 e C7 realizadas em Setembro de 2017, Fevereiro de 2018, Maio de 2018 e Setembro de 2018 respectivamente. Para determina-

ção dos deslocamentos foi considerada como base a época C3 realizada em Junho de 2016.

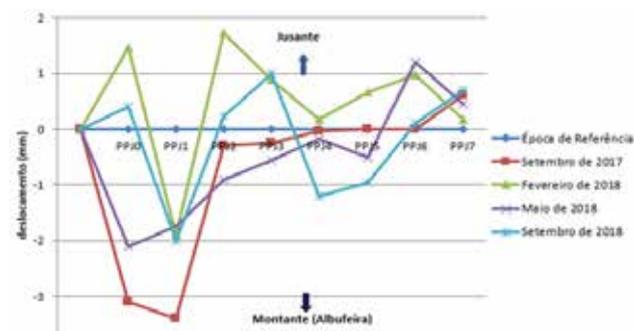


Figura 7: Evolução dos deslocamentos horizontais (eixo x) dos pontos objectos à jusante. Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Na figura 7, apresenta-se os deslocamentos horizontais no eixo x dos pontos objectos localizados à jusante. Registados entre as épocas já realizadas, ou seja, C3 em Junho de 2016, C4 em Setembro de 2017, C5 em Fevereiro de 2018, C6 em Maio de 2018 e C7 em Setembro de 2018.

Ao observar a figura, pode-se verificar que, na época C4 realizadas em setembro de 2017, os pontos, em geral, evoluíram no sentido da montante (albufeira) da barragem, nas épocas C5 realizada em Fevereiro de 2018 e C6 realizada em Maio de 2018, houve uma tendência dos pontos movimentarem-se em direcção à jusante com um valor máximo de 3,4 mm. Já na época C7 realizada em Setembro de 2018, houve uma tendência dos pontos movimentarem-se em direcção à montante (albufeira) da barragem com um valor máximo de 1,7 mm.

Na figura 8, constata-se que, nas épocas C4 realizadas em setembro de 2017 e C6 realizada em Maio de 2018, os pontos evoluíram no sentido da zona do estaleiro da

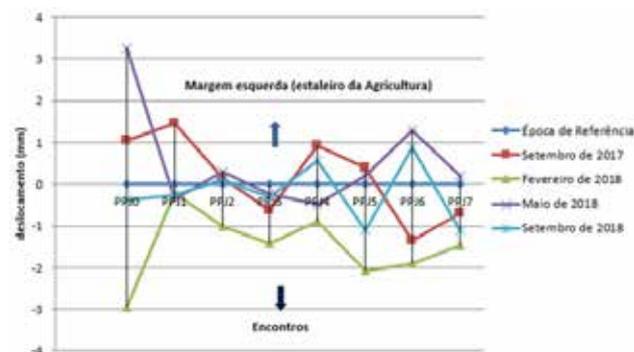


Figura 8: Evolução dos deslocamentos horizontais no eixo Y dos pontos objectos localizados à jusante da barragem. Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

agricultura. Já nas épocas C5 realizadas em Fevereiro de 2018 e C7 em Setembro de 2018, os pontos, em geral, deslocaram-se em direcção à margem direita.

Tabela 9. Deslocamento do ponto PJ0 localizado no talude da jusante. Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Datas	x	Desl. (mm)	y	Desl.(mm)
26/jun/016	410,4682	0,0	737,2777	0,0
22/set/017	410,4651	-3,1	737,2787	+1,0
22/fev/018	410,4697	+1,5	737,2747	-3,0
27/mai/018	410,4661	-2,1	737,2809	+3,2
12/set/018	410,4686	+0,4	737,2773	-0,4

RESULTADOS DA REDE ALTIMÉTRICA

Pontos Objectos à Montante

Nas tabelas que se seguem são apresentados os deslocamentos verticais absolutos de alguns pontos objectos localizados à montante, de Junho de 2016 a Setembro de 2018. Para determinação dos deslocamentos verticais absolutos apresentados nas tabelas abaixo, foi considerada como base a campanha C3 realizada em Junho de 2016 e compararam-se as campanhas C4, C5, C6 e C7 realizadas em Setembro de 2017, Fevereiro de 2018, Maio de 2018 e Setembro de 2018 respectivamente.

Tabela 10. Deslocamento verticais absolutos do ponto PFNM1 localizado no talude à montante. Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Datas	Cota (m)	Desl. (mm)
26/jun/016	24,2091	0,0
22/set/017	24,21191	+2,8
26/fev/018	24,21161	+2,5
27/mai/018	24,21079	+1,7
12/set/018	24,21140	+2,3

Tabela 11. Deslocamento verticais absolutos do ponto PFNM2 localizado no talude à montante. Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Datas	Cota (m)	Desl. (mm)
26/jun/016	25,04910	0,0
22/set/017	25,04570	-3,4
26/fev/018	25,04770	-1,4
27/mai/018	25,04722	-1,9
12/set/018	25,04713	-2,0

Tabela 12. Deslocamento verticais absolutos do ponto PFNM3 localizado no talude à montante. Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Datas	Cota (m)	Desl. (mm)
26/jun/016	25,41889	0,0
22/set/017	25,41370	-5,1
26/fev/018	25,41680	-2,1
27/mai/018	25,41714	-1,8
12/set/018	25,41673	-2,2

A evolução dos deslocamentos verticais absolutos dos pontos objectos localizados no parâmetro à montante está representado graficamente na figura 9.

Ao observar a figura, é possível verificar que a partir da época C4 realizada em Setembro de 2017, os pontos, em geral, apresentaram uma certa estabilidade. Porém, pode-se constatar que os pontos de referência (PFNM2, PFNM3, PFNM4) projectados como fixos e localizados na zona de encontro entre o corpo da barragem e maciço da margem direita, local onde se procederam a injecções de calda de cimento, são os que registaram maiores assentamentos.

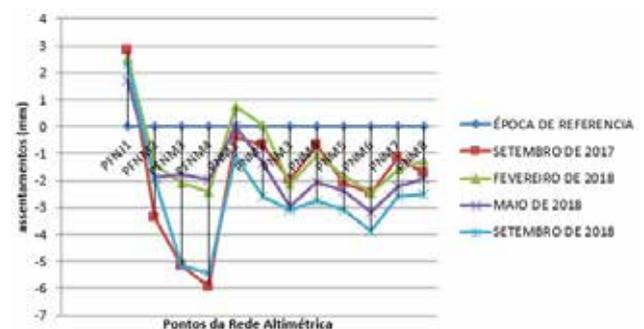


Figura 9: Evolução dos deslocamentos verticais dos pontos objectos localizados à montante da barragem.

Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Pontos Objectos à Jusante

Nas tabelas que se seguem são apresentados os deslocamentos verticais absolutos de todos os pontos localizados à jusante de Junho de 2016 a Setembro de 2018. Para determinação dos deslocamentos verticais absolutos apresentados nas tabelas abaixo, foi considerada como base a campanha C3 realizada em Junho de 2016 e compararam-se as campanhas C4, C5, C6 e C7 realizadas em Setembro de 2017, Fevereiro de 2018, Maio de 2018 e Setembro de 2018 respectivamente.

Tabela 13. Deslocamento verticais absolutos do ponto PNJ1 localizado no talude à jusante. Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Datas	Cota (m)	Desl. (mm)
26/jun/016	22,30286	0,0
22/set/017	22,30580	+2,9
26/fev/018	22,30494	+2,1
27/mai/018	22,30580	+2,9
12/set/018	22,30609	+3,2

Tabela 14. Deslocamento verticais absolutos do ponto PNJ2 localizado no talude à jusante. Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Datas	Cota (m)	Desl. (mm)
26/jun/016	22,77907	0,0
22/set/017	22,7804	+1,4
26/fev/018	22,77961	+0,5
27/mai/018	22,78001	+0,9
12/set/018	22,78068	+1,6

Tabela 15. Deslocamento verticais absolutos do ponto PNJ3 localizado no talude à jusante. Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Datas	Cota (m)	Desl. (mm)
26/jun/016	23,13180	0,0
22/set/017	23,1319	+0,1
26/fev/018	23,13216	+0,4
27/mai/018	23,13197	+0,2
12/set/018	23,13223	+0,4

Tabela 16. Deslocamento verticais absolutos do ponto PNJ4 localizado no talude à jusante. Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Datas	Cota (m)	Desl. (mm)
26/jun/016	23,41471	0,0
22/set/017	23,4140	-0,7
26/fev/018	23,41345	-1,3
27/mai/018	23,41284	-1,9
12/set/018	23,41168	-3,0

Tabela 17. Deslocamento verticais absolutos do ponto PNJ5 localizado no talude à jusante. Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Datas	Cota (m)	Desl. (mm)
26/jun/016	23,62159	0,0
22/set/017	23,6238	+2,3
26/fev/018	23,62448	+2,9
27/mai/018	23,62472	+3,1
12/set/018	23,62543	+3,8

Tabela 18. Deslocamento verticais absolutos do ponto PNJ6 localizado no talude da jusante. Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Datas	Cota (m)	Desl. (mm)
26/jun/016	23,14351	0,0
22/set/017	23,1410	-2,5
26/fev/018	23,14151	-2,0
27/mai/018	23,14138	-2,1
12/set/018	23,14199	-1,5

Tabela 19. Deslocamento verticais absolutos do ponto PNJ7 localizado no talude à jusante. Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Datas	Cota (m)	Desl. (mm)
26/jun/016	22,15914	0,0
22/set/017	22,1573	-1,9
26/fev/018	22,15801	-1,1
27/mni/018	22,15800	-1,1

Tabela 20. Deslocamento verticais absolutos do ponto PNJ8 localizado no talude à jusante. Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Datas	Cota (m)	Desl. (mm)
26/jun/016	23,31670	0,0
22/set/017	23,3145	-2,2
26/fev/018	23,31493	-1,8
27/mai/018	23,31480	-1,9
12/set/018	23,31471	-2,0

A evolução dos deslocamentos verticais absolutos dos pontos objectos localizados no parâmetro à jusante está representado graficamente na figura 10.

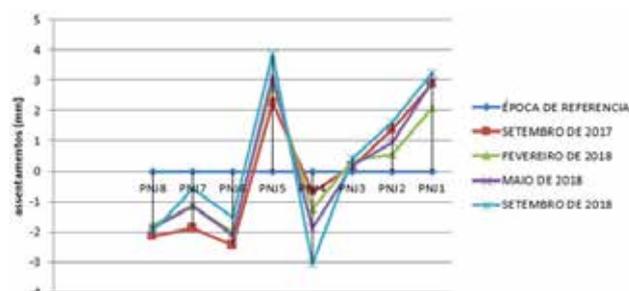


Figura 10: Evolução dos deslocamentos verticais dos pontos objectos localizados à jusante da barragem.

Fonte: (Carvalho A. et I.C. 2018)

Ao observar a figura 10, é possível verificar que, a partir da época C4 realizada em Setembro de 2017, os pontos objectos, em geral, apresentaram certa estabilidade, registando variações inferiores a 1,0 mm.

CONCLUSÕES

Para medição de deslocamentos absolutos na rede geodésica de monitoramento é necessário a existência de pelo menos dois (2) pontos considerados fixos, que servem de referência para o cálculo dos deslocamentos dos restantes pontos a observar (pontos-objectos). Os testes aplicados nas diferentes épocas de levantamento (Agosto 2015 e Março 2016) mostram, que as variações das distâncias medidas entre os marcos de referência (PT1,PT2,PT3,PT4) atingem o valor máximo de 0,4 mm com um intervalo de erro de 0,6 mm. Portanto, pelos métodos e equipamentos utilizados, pode-se concluir que as variações das distâncias entre os marcos de referência não são significativas a um nível de significância de 5%. Pelo que se infere que não têm tido movimentos horizontais, ou seja, são estáveis. Já os resultados da rede altimétrica mostraram que embora a linha de nivelamento tenha sido projectada com cinco marcos de referência, sendo dois na margem esquerda (PFNM1, PFNM1) e três na margem direita (PFNM2, PFNM3, PFNM4), as cotas dos marcos da margem direita (PFNM2, PFNM3, PFNM4) registaram uma variação máxima de 6 mm, portanto, verifica-se pelos métodos e equipamentos uti-

lizados, que a zona onde se encontram materializados os respectivos marcos, é estável.

Depois de comparar as coordenadas e cotas dos pontos objectos, obtidas em diferentes épocas, constatou-se que de Junho de 2016 à Setembro de 2018 a estrutura da barragem da Quiminha registou deslocamentos inferior a 6 mm, o que implica que, de acordo com a norma técnica de estabilidade de taludes (NBR11682), o deslocamento é de baixo risco, portanto, não apresenta risco aos moradores localizados à jusante.

Assim, em função dos resultados obtidos conclui-se que os pontos de monitoramento aliados aos métodos geodésicos atenderam os requisitos necessários para realização do monitoramento, tornando-se uma ferramenta fundamental para auxiliar na tomada de decisão nas acções a serem efectuadas, para garantir a segurança da estrutura da barragem, e dos habitantes localizados à jusante.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Agostinho Neto (UAN) - Faculdade de Ciências

Ao Laboratório de Engenharia de Angola (LEA)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Adelmo, M. Meteorologia e Climatologia. *Brasil: Oficinas de Textos*, 2006.
- [2] Amorim. Ajustamento de Observações. *Brasil: Geomática*, 2015.
- [3] Borisovich. *Nivelamento de alta precisão*. Rússia: MIR, 2015.
- [4] Borisovich, Mixeleve. *Geodesia aplicada na construção e exploração*. Rússia: MIR, 2016.
- [5] Borisovich, Mixeleve. *Prática de Geodesia aplicada*. Rússia: MIR, 2015.

- [6] Borisovich, Mixeleve, Bapkov. *Geodesia aplicada na construção e exploração de estruturas de engenharia*. Rússia: NEDRA, 1983.
- [7] Castro, Henriques. *Monitoring planimetric displacements in concrete dams*, Lisboa:2008.
- [8] Chexovtsove. *Métodos geodésicos de determinação de assentamentos de estruturas*. Rússia: 2009.
- [9] CNIIGAİK. *Centro de Investigação Científica da Universidade de Geodesia de Moscovo*. Rússia: 2000.
- [10] CONSULGEO. *Tratamento para controlo da percolação pelo maciço da margem direita da barragem da Quiminha*, ANGOLA:2005.
- [11] Gorelove. *Método Geodésico de Observações de Deformações de estruturas Hidrelécticas*. Rússia: ENER-GIA, 2006.
- [12] IGCA. *Normas técnicas de nivelamento*. Angola: IGCA, 1987.
- [13] Júlio Fonseca. *O papel do Laboratório de Engenharia de Angola LEA*. Luanda: 2018.
- [14] Marfenco. *Observações Geodésicas na Determinação das Deformações de estruturas*. Rússia: MII-GAiK, 2004.
- [15] Markuze, Dmitrievich. *Teoria Matemática de Medições Geodésicas*. Rússia: MIR, 2008.
- [16] Nazarove. *Conceitos Fundamentais de Nivelamento de curtas visadas*. Rússia: MIR, 2006.
- [17] NBR. *Estabilidade de Taludes*. Brasil: ABNT, 2002.
- [18] Palma Carlos. *Aproveitamento hidroagrícola da Quiminha - Projecto da Barragem e órgãos de descarga e segurança da albufeira*. Lisboa: 1964.
- [19] RAMOS. *Segurança estrutural de Barragens de betão*. Departamento de Barragens, LNEC, 2004.
- [20] Vorochilove. *Principais características do nivelamento trigonométrico de curtas visadas*. Rússia: MII-GAiK, 2015.
- [21] Wolf, P. R; Ghilani, C. D. *Elementary Surveying – An Introduction to Geomatics*. Pentrice Hall, 2002.

