

Monitorização da cinemática de um movimento de vertente com recurso a uma estação total e um sistema inclinométrico: o caso do lugar da Maia (ilha de Santa Maria, Açores)

Kinematics monitoring of a landslide using a total station and an inclinometric system: the case of Maia (Santa Maria Island, Azores)

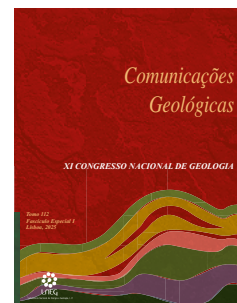
R. Fagundes Silva^{1,2*}, R. Marques^{1,2}

DOI: <https://doi.org/10.34637/1dq0-xr02>

Recebido em 31/07/2023 / Aceite em 18/01/2024

Publicado online em abril de 2025

© 2025 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP



Artigo original
Original article

Abstract: In March 2010, a landslide with 18,500 m² caused several damages at Maia (Santa Maria Island). In order to evaluate the kinematic behaviour and the geometry of the unstable mass, it was architected and implemented a permanent geodetic and inclinometric monitoring network. The results of the geodetic network demonstrates a heterogeneous spatial deformation pattern in the unstable mass. The planimetric and altimetric displacement is highest at the toe of the deposit, close to the shoreline, with maximum accumulated displacement since 2012 of 0.054 m and 0.012 m, respectively. The failure surface is located between 18.0 m and 18.5 m in depth in the FSM1 borehole and between 15.5 m and 16.0 m in the FSM2 borehole. The maximum accumulated displacement in depth is 0.019 m and 0.020 m in the FSM1 and FSM2 boreholes, respectively.

Keywords: Landslides, Monitoring, Total Station, Inclinometer, Azores

Resumo: Em março de 2010, um deslizamento do tipo rotacional com 18.500 m² causou vários danos na Maia (ilha de Santa Maria). De forma a avaliar o comportamento cinemático e a geometria da massa instável, foi arquitetada e implementada uma rede de monitorização inclinométrica e uma rede de monitorização geodésica permanente. Os resultados da rede geodésica demonstram um padrão de deformação espacial heterogéneo da massa instável. O deslocamento planimétrico e altimétrico é maior na zona do pé do depósito, próximo da linha de costa, com deslocamentos máximos acumulados desde 2012 de 0,054 m e 0,012 m, respetivamente. A superfície de rotura localiza-se entre 18,0 m e 18,5 m de profundidade no furo de sondagem FSM1 e entre 15,5 m e 16,0 m no furo de sondagem FSM2. O deslocamento máximo acumulado em profundidade é de 0,019 m e 0,020 m no local dos furos FSM1 e FSM2, respetivamente.

Palavras-chave: Movimentos de vertente, Monitorização, Estação Total, Inclinómetro, Açores

¹ Instituto de Investigação em Vulcanologia e Avaliação de Riscos. Universidade dos Açores, 9500-321 Ponta Delgada, Portugal.

² Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores, Universidade dos Açores, 9500-321 Ponta Delgada, Portugal.

* Autor correspondente / Corresponding author: Rui.FF.Silva@azores.gov.pt

1. Introdução

A monitorização baseia-se na observação, controlo e medição de grandezas correlacionáveis que permitem uma melhor compreensão dos fenómenos. A monitorização assente na instrumentação permite conhecer as causas, o comportamento e

as características dos movimentos de vertente, possibilitando uma tomada de decisão mais sustentada. Este estudo apresenta a implementação e os resultados da monitorização de um movimento de vertente desencadeado em 2010 no lugar da Maia (ilha de Santa Maria, Açores), que provocou danos em 10 edifícios, nas redes de abastecimento de água e eletricidade e na única estrada de acesso ao lugar. O deslizamento apresenta cerca de 200 m de comprimento máximo, 150 m de largura máxima e uma área de 18.500 m² (Figura 1).

2. Enquadramento geológico e geomorfológico

O deslizamento está localizado na base de uma arriba fósil com aproximadamente 210 m de altura e inclinação vertical. O topo do movimento de vertente apresenta uma inclinação entre os 35° e 40°,



Figura 1. Aspeto geral do movimento de vertente em estudo (a linha a tracejado corresponde à delimitação do movimento de vertente).

Figure 1. General view of the landslide under study (the dashed line corresponds to the landslide delimitation).

diminuindo até aos 5° à medida que a cota decresce. A maioria das edificações e outras estruturas está presente na zona de menor declive, sendo a restante área ocupada por currais de vinha. A jusante encontra-se a arriba atual com cerca de 10 m de altura e inclinação vertical.

Sob o ponto de vista geológico (Figura 2), a base da arriba fóssil é composta por uma sucessão de escoadas lávicas basálticas (*s.l.*) de origem submarina (LRs) e na crista afloram escoadas lávicas subaéreas (MPA) (Serralheiro e Madeira, 1990). O depósito de vertente corresponde a um depósito sedimentar (dv) de idade quaternária (Holocénica), cuja génese está relacionada com o desmonte da arriba fóssil e erosão dos materiais (Serralheiro e Madeira, 1990). Este depósito apresenta elevada heterogeneidade granulométrica, composto por seixos, calhaus e blocos e uma matriz silto-argilosa.

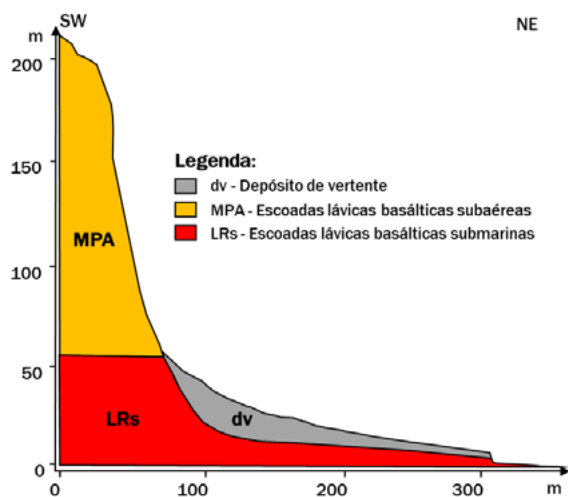


Figura 2. Perfil geológico e geomorfológico da área de estudo.

Figure 2. Geological and geomorphological profile of the study area.

3. Redes de monitorização

Com o objetivo de avaliar o comportamento cinemático e a geometria da massa instável, foi arquitetada e implementada em 2012 uma rede de monitorização geodésica permanente (Marques *et al.*, 2014). Devido à cinemática do deslizamento, em 2017, foi instalada uma rede inclinométrica, o que permitiu a monitorização da deformação em profundidade (Marques *et al.*, 2017). A figura 3 apresenta a configuração da rede de monitorização geodésica permanente e da rede de monitorização inclinométrica. O programa de monitorização multiparamétrico implementado é suportado por uma prestação de serviços realizada pelo Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores (CIVISA) para o Governo Regional dos Açores, através da Direção Regional do Ordenamento do Território e Recursos Hídricos (DROTRH) da Secretaria Regional do Ambiente e Alterações Climáticas (SRAAC).

A rede de monitorização geodésica é composta por uma Estação Total Leica TM30, dois pontos de controlo, fixados em locais estáveis e 21 pontos de monitorização implementados em pilares de betão e em estruturas pré-existentis (*e.g.* casas e paredes). A rede está em funcionamento 24/7 e os dados são recolhidos com uma periodicidade de três horas.

A rede de monitorização inclinométrica é constituída por dois furos (FSM1 e FSM2) com 21,1 m e 20,1 m de profundidade, respetivamente, onde foi instalada uma calha inclinométrica da RST Instruments. Ambos os furos atravessam, ao longo da sua extensão,

depósitos de vertente provenientes do desmonte da arriba fóssil que lhes é sobranceira, e na base intercetam uma escoada lávica submarina de natureza basáltica (*s.l.*).

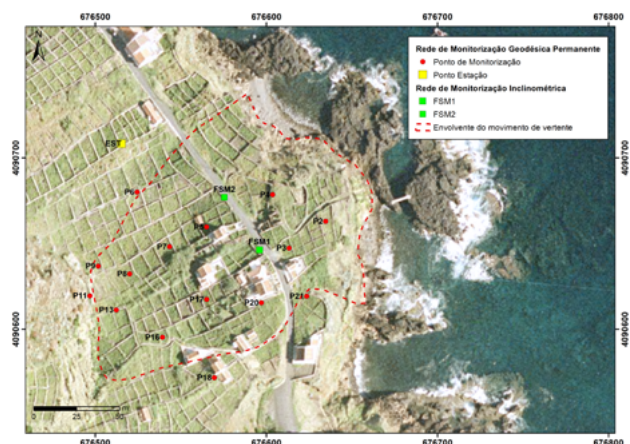


Figura 3. Configuração da rede de monitorização geodésica permanente e da rede de monitorização inclinométrica.

Figure 3. Configuration of the permanent geodetic monitoring network and the inclinometric monitoring network.

4. Resultados

Os resultados da rede geodésica demonstram um padrão de deformação espacial heterogéneo da massa instável (Figura 4). Este comportamento é consequência do volume de material mobilizado, bem como da topografia do terreno.

Verifica-se que a massa instabilizada de terreno tende, na globalidade, a movimentar-se no sentido NE, ou seja, em concordância com o sentido descendente do terreno, em direção ao oceano. A exceção são os pontos de monitorização P6 e P21, cujos sentidos de deslocamento, contrários à maioria, indicam, provavelmente, o movimento por tombamento do bastão onde o prisma de monitorização é acoplado e que coincide com os flancos do movimento de vertente. No setor a montante da estrada existe um deslocamento preferencial na parte central da massa de terreno instabilizada, sendo maior nos pontos P8, P13 e P17. A jusante da estrada o deslocamento aumenta com a proximidade à crista da arriba (pontos P2, P3 e P4).

Relativamente à deformação em altimetria (Figura 5), verifica-se um abatimento preferencial na zona central da massa instável (pontos P7, P8 e P13). Tal facto está em concordância com a topografia do terreno, pois coincide com a zona mais côncava do terreno, onde é promovida uma maior acumulação de água por escorrência superficial. À semelhança do descrito por Marques *et al.* (2014), verifica-se que o movimento de vertente apresenta uma deformação permanente, cuja cinemática reflete a influência do regime de precipitação, bem como o efeito de outros parâmetros atmosféricos (*e.g.* temperatura e humidade). Tal facto traduz-se em períodos de deformação mais lenta e períodos mais ativos em resultado das propriedades dos materiais e de diferentes teores em água ao longo do ano.

Os dados obtidos a partir da rede de monitorização inclinométrica permitiram a identificação da superfície de rotura entre 18,0 m e 18,5 m de profundidade no furo FSM1 (Figura 6) e entre 15,5 m e 16,0 m de profundidade no furo FSM2 (Figura 7). O deslocamento máximo acumulado do movimento de vertente é de 18,5 mm e 21,5 mm a 7,0 m e 1,0 m de profundidade, nos furos FSM1 e FSM2, respetivamente. O deslocamento acumulado da massa instável sobre o

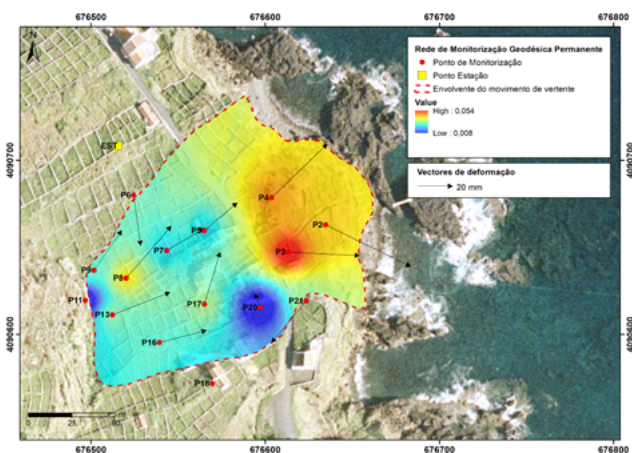


Figura 4. Deslocamento planimétrico para o período 2012 - 2023.

Figure 4. Planimetric displacement for the period 2012 - 2023.

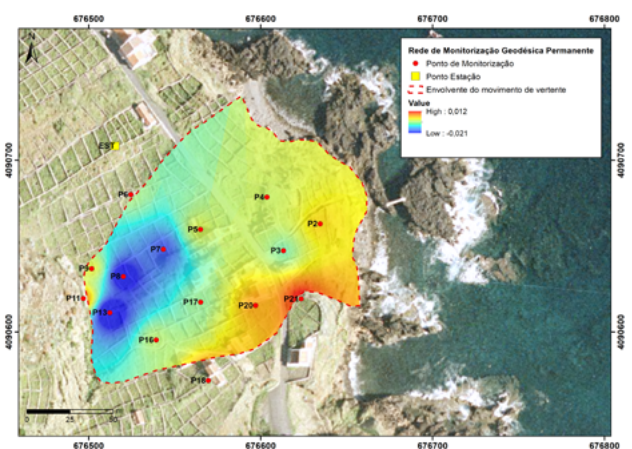


Figura 5. Deslocamento altimétrico para o período 2012 - 2023.

Figure 5. Altimetric displacement for the period 2012 - 2023.

material subjacente (estável) é de 15,0 mm e 15,5 mm nos furos FSM1 e FSM2, respetivamente. Verifica-se uma diminuição da deformação com a aproximação ao plano de rotura, causada pelo atrito do material instabilizado sobre o material subjacente. Pela análise das figuras 6 e 7, é igualmente possível observar vários aumentos do deslocamento nos furos ao longo do programa de monitorização, coincidentes com valores mais elevados de precipitação acumulada. Em dezembro de 2018 e em dezembro de 2021 foi possível detetar um deslocamento de 4 mm entre duas medições. Em janeiro de 2022, verificou-se a maior aceleração da massa instável desde o início da monitorização inclinométrica, com um deslocamento de cerca de 8 mm registado entre duas medições.

5. Considerações finais

Os resultados apresentados para a rede geodésica permanente com recurso a uma estação total demonstram um padrão de deformação espacial heterogéneo na massa de terreno instável que afeta o lugar da Maia.

Destaca-se um maior deslocamento planimétrico e um abatimento no setor a montante da estrada na parte central da massa de terreno instabilizada, o que poderá estar associado à morfologia côncava do movimento de vertente. Tal facto, promove a acumulação

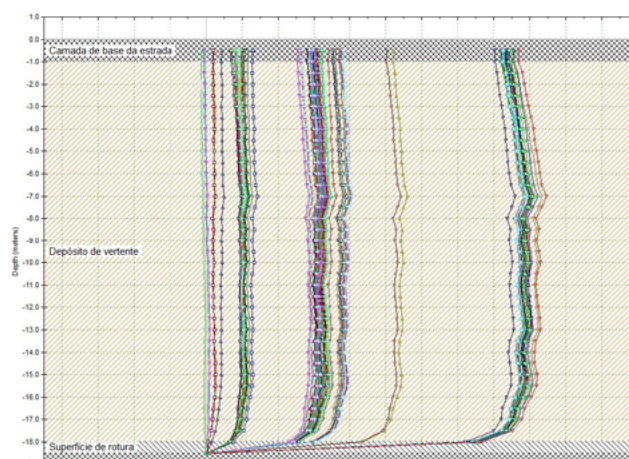


Figura 6. Deslocamento acumulado para o furo FSM1 com intervalo de medição de 0,50 m no período 2017 - 2023.

Figure 6. Cumulative displacement for borehole FSM1 with 0.50 m measurement interval for the period 2017 - 2023.

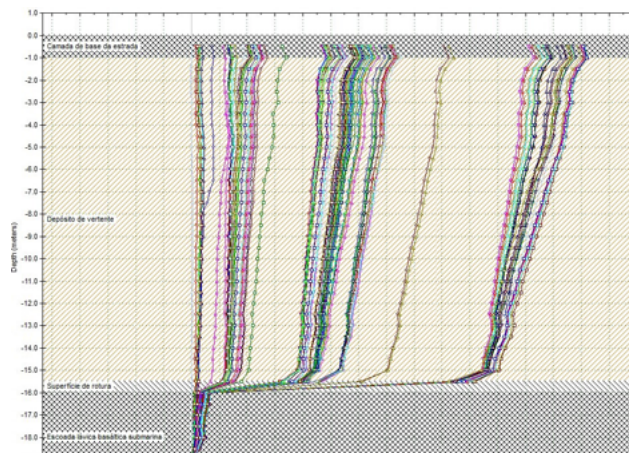


Figura 7. Deslocamento acumulado para o furo FSM2 com intervalo de medição de 0,50 m no período 2017 - 2023.

Figure 7. Cumulative displacement for borehole FSM2 with 0.50 m measurement interval for the period 2017 - 2023.

de água por escorrência superficial e concomitantemente o aumento da carga efetiva e da tensão cisalhante neste setor. Importa ainda realçar que a jusante da estrada o deslocamento planimétrico e altimétrico aumenta com a proximidade à crista da arriba. Tal constatação é justificada pela ação erosiva do mar no pé do movimento de vertente que potencia uma maior deformação da massa instabilizada neste setor.

Desde o início da monitorização inclinométrica, em outubro de 2017, o deslocamento acumulado máximo da massa instabilizada em profundidade é de 18,5 mm e 21,5 mm, aos 7,0 m e 1,0 m de profundidade, nos furos FSM1 e FSM2, respetivamente. Os resultados obtidos com base na rede de monitorização inclinométrica permitiram identificar a superfície de rotura do movimento de vertente entre os 18,0 m e os 18,5 m de profundidade no furo FSM1 e entre os 15,5 m e os 16,0 m de profundidade no furo FSM2. De forma geral, a velocidade de deformação ao longo do perfil vertical do terreno é relativamente homogénea no furo FSM1 e tendencialmente

decrecente com o aumento da profundidade no furo FSM2. O comportamento da cinemática do movimento de vertente em profundidade é fortemente determinado pelo maior ou menor teor em água do solo, verificado pelas variações na velocidade de deslocamento da massa.

Referências

- Marques, R., Pacheco, P., Amaral, P., Gaspar, J.L., 2014. Desenvolvimento e implementação de um sistema de monitorização automático para movimentos de vertente em tempo real com recurso a uma estação total: um caso de estudo no lugar da Maia (ilha de Santa Maria, Açores). *Comunicações Geológicas, Especial II*: 907-911.
- Marques, R., Pacheco, P., Silva, R.F., 2017. *Monitorização de Movimentos de Vertente na Maia, Praia Formosa e Panasco (Ilha de Santa Maria). R.1 – Ponto de situação da monitorização geodésica, inclinométrica e piezométrica (setembro - novembro de 2017)*. Documento Técnico-Científico 017/IVAR/CIVISA/17.
- Serralheiro, A., Madeira, J., 1990. Stratigraphy and geochronology of Santa Maria Island (Azores). *Livro de homenagem a Carlos Romariz. Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*, 357-376.