

MITIGAÇÃO DO RISCO DE INSTABILIZAÇÃO DA ENCOSTA DO MIRADOURO DE SÃO PEDRO DE ALCÂNTARA EM LISBOA

LANDSLIDE RISK MITIGATION OF "SÃO PEDRO DE ALCÂNTARA" VIEWPOINT SLOPE IN LISBON

Pinto, Alexandre; JETSj Geotecnia, Lda., Lisboa, Portugal, apinto@jetsj.com

Cristóvão, António; JETSj Geotecnia, Lda., Lisboa, Portugal, acristovão@jetsj.com

Fartaria, Catarina; JETSj Geotecnia, Lda., Lisboa, Portugal, cfartaria@jetsj.com

Godinho, Luís; Câmara Municipal de Lisboa, Lisboa, Portugal, luis.godinho@cm-lisboa.pt

Rocha, Miguel; Teixeira Duarte Engenharia e Construções S.A., Lisboa, Portugal, mr@teixeiraduarte.pt

RESUMO

A encosta na qual se localiza o Miradouro São Pedro de Alcântara, em Lisboa, tem sido alvo de diversas campanhas de observação e de monitorização, com o intuito de tentar antecipar a identificação de eventuais processos evolutivos que possam vir a comprometer a estabilidade da mesma. No âmbito das mais recentes campanhas de monitorização, constatou-se a presença de movimentos horizontais em profundidade, não desprezáveis e de carácter evolutivo, assim como fendas de magnitude apreciável nos muros de suporte existentes. Os fenómenos ocorrentes foram analisados e enquadrados, do ponto de vista geológico-geotécnico, tendo motivado uma intervenção de reforço estrutural e geotécnico com o propósito de mitigar o risco associado à perda de estabilidade global da encosta e de estabilidade local das plataformas e dos muros de suporte. As medidas implementadas incluíram a execução de estruturas de reforço em profundidade, materializadas por contrafortes constituídos por estacas moldadas de betão, o alívio das cargas ativas na plataforma superior, com recurso substituição do solo por aterro de agregados leves, e ainda o restabelecimento dos sistemas de drenagem.

ABSTRACT

São Pedro de Alcântara is a viewpoint that falls in one of Lisbon main slopes. The site has been under observation and monitoring aiming to follow up its behavior and to foresee possible instability phenomena affecting the slope behavior under both static and dynamic loads. Considering the last years monitoring campaigns, and specifically the records of inclinometers installed in 2010, the presence of horizontal cumulative movements was observed in deeper soil layers with a progressive tendency, together with the formation of cracks at the retaining walls. The slope and retaining structures overall behavior was investigated, leading to an intervention that included both structural and geotechnical reinforcement for global and local stabilization with the purpose to mitigate the landslide risk. The main implemented solutions included: buttress of concrete bored piles, weight relief with the replacement of soil by light weight aggregates and the refurbishment of the drainage systems.

1 - INTRODUÇÃO

A aquisição do Jardim de S. Pedro de Alcântara pela Câmara Municipal de Lisboa (1732) teve por objetivo a construção de uma Mãe de Água, que abasteceria a zona Oriental da cidade por intermédio de um aqueduto, o qual, por sua vez, venceria todo o vale. A constituição de um vasto terraço, na segunda metade do Século XVIII, teve por objetivo a constituição da base de suporte das fundações do aqueduto, permitindo ainda a implantação de um chafariz e de um depósito de água. As obras inicialmente projetadas nunca chegaram a ser concluídas, com exceção do forte paredão de suporte ao terrapleno e do chafariz que ainda hoje se encontra no local. Desde então, toda a área sofreu diversas alterações até se ter tornado num jardim público, funcionalidade que o espaço conserva desde 1835. Apresenta-se na Figura 1 a vista aérea panorâmica da obra em estudo. A zona onde se insere o Miradouro de S. Pedro de Alcântara foi modelada por socacos, os quais são suportados por dois muros de gravidade, constituídos por alvenaria de pedra e reforçados por contrafortes orientados para intradorso. Estas duas estruturas de suporte de terras dividem as plataformas, superior e inferior do Miradouro, ao nível das Ruas de S. Pedro de Alcântara e Rua das Taipas, respetivamente. A plataforma inferior é limitada, a Poente, pelo muro da plataforma superior, com cerca de 5,6m de altura e a Nascente pelo muro inferior, com uma altura máxima de cerca de 11m, que permite o desnível desta plataforma com a Rua das Taipas (ver Figura 1).



Figura 1 – Vista do Miradouro de São Pedro de Alcântara e das principais condições de vizinhança

Entre a Rua das Taipas e a Travessa do Fala-Só existe um novo socalco, suportado por um terceiro muro que, na intersecção com a Rua da Glória, apresenta uma altura da ordem dos 15m. Toda a encosta em estudo apresenta um declive acentuado, marcado pela presença de socalcos e de muros de suporte, que conferem a planimetria desejada a cada plataforma e que permitem vencer desníveis assinaláveis. A topografia do terreno é assim caracterizada quer pela geomorfologia local, que se desenvolve entre o Príncipe Real e a Avenida da Liberdade, quer pela ação continuada de movimentos de terras associados à constituição de plataformas de aterro, mais ou menos importantes. Ao longo do desenvolvimento da encosta posicionavam-se diversas linhas de água, regra geral subsidiárias de antigos cursos de água principais que corriam na direção do rio Tejo. O escoamento das águas superficiais nos principais cursos de água e nas suas linhas de água subsidiárias ocasionou maioritariamente o entalhe das formações miocénicas. Atualmente, e devido à intensa urbanização, as referidas linhas de água encontram-se, de um modo geral, ocultas, encontrando-se esta vertente fortemente impermeabilizada, sendo assim preponderante a escorrência superficial. Existem, contudo, registos de intervenções de reparação de zonas cavernosas, determinadas pela percolação da água, ao nível das plataformas do Miradouro de São Pedro de Alcântara, as quais poderão determinar fenómenos de instabilidade superficial.

2 - PRINCIPAIS INDICADORES DE INSTABILIDADE

A observação do comportamento das estruturas de suporte do Miradouro de S. Pedro de Alcântara e da encosta que se desenvolve entre a Rua de S. Pedro de Alcântara, a Rua das Taipas/Rua da Glória e a Travessa do Fala-Só tem sido alvo de campanhas de observação/monitorização e de reconhecimento geológico e geotécnico. A monitorização do comportamento do dispositivo geológico assentou na análise dos deslocamentos de calhas inclinométricas e de alvos topográficos, que permitiram constatar movimentos em profundidade, em geral, não desprezáveis. O resultado cumulativo destes movimentos estará na origem das fendas de magnitude apreciável observáveis no muro que suporta a plataforma inferior (ver Figura 2).



Figura 2 – Vista das fissuras nos muros existentes

Da apreciação global dos deslocamentos observados nas calhas inclinométricas foi possível constatar que, durante os últimos 5 anos, ocorreram movimentos horizontais, em geral, não desprezáveis e de carácter evolutivo. Os deslocamentos de maior magnitude ocorreram até profundidades aproximadamente coincidentes com a cota da Rua das Taipas. No entanto, registam-se também deslocamentos até profundidades superiores na ordem dos 30m (Figura 3). Por sua vez, ao nível dos alvos topográficos instalados no muro inferior, foram registados movimentos igualmente significativos, observando-se distorções na ordem de 1/480. Este tipo de fenómenos mereceram a maior das atenções, dado poderem estar associados a fenómenos de instabilidade global de elevada magnitude e cuja resolução técnica envolveria, na grande maioria dos casos, um elevado grau de complexidade (Pinto et al., 2007; Pinto e Pereira, 2016; Pinto e Tomásio, 2016).

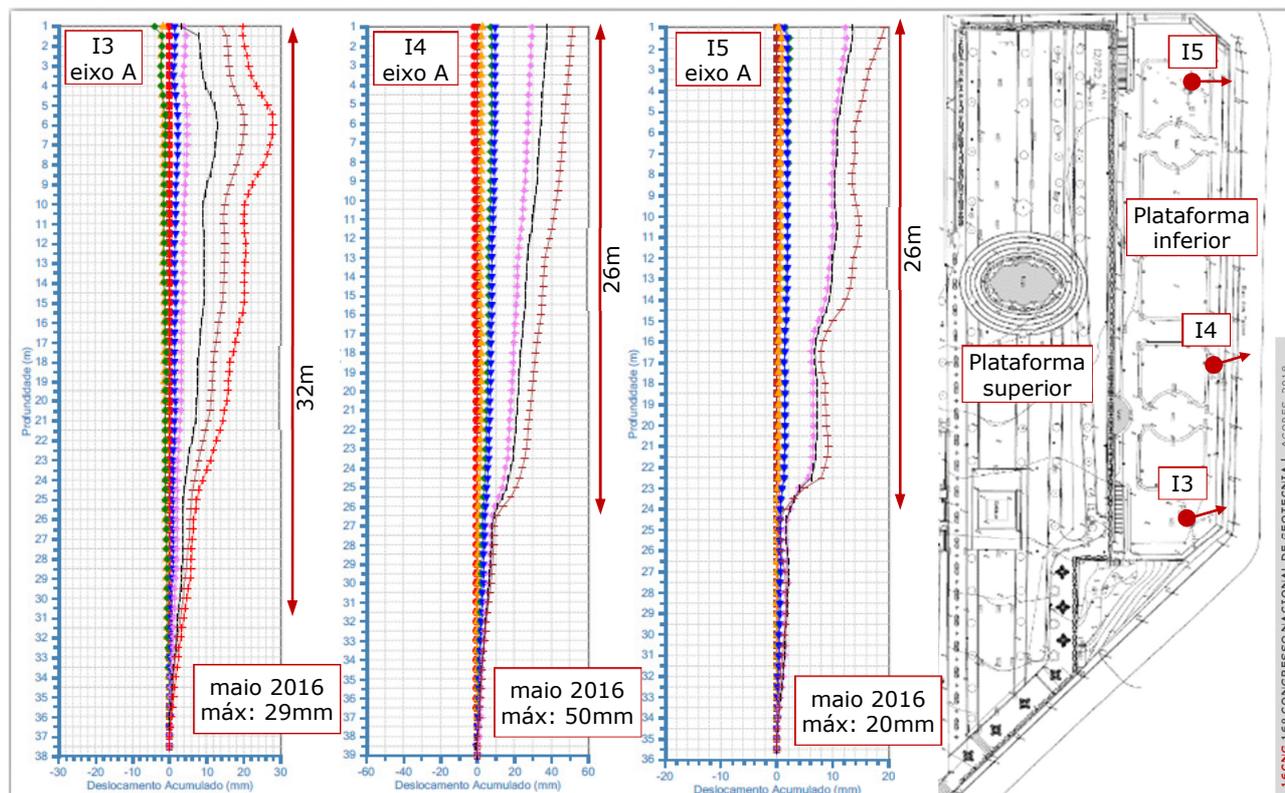


Figura 3 –Registo dos movimentos acumulados nos inclinómetros instalados em 2011 na plataforma inferior

3 - PRINCIPAIS CONDICIONAMENTOS

Como principais condicionamentos que afetaram as soluções de estabilização adotadas, podem ser destacados os seguintes:

- Condições geológicas e hidrogeológicas, tendo sido definidas três zonas geotécnicas: ZG3 – aterros heterogéneos, constituídos predominantemente por areias argilosas; ZG2 – formações Miocénicas descomprimidas, constituídas essencialmente por argilas siltsosas e arenosas; ZG1 – formações Miocénicas rijas, constituídas predominantemente por argilas siltsosas muito rijas. Os principais objetivos da solução seriam assim o de melhorar a estabilidade global da encosta, bem como as respetivas condições de drenagem;
- Condições de vizinhança: a solução a implementar deveria permitir a minimização da ocorrência de eventuais deformações nos terrenos e construções vizinhas, em particular que penalizassem a integridade dos muros de suporte existentes, da fonte e do parque imobiliário e artístico localizado na plataforma inferior;
- Condições de acessibilidade e de circulação automóvel na envolvente: atendendo ao enquadramento urbano da intervenção, seria desejável o recurso a soluções que minimizassem o volume de terraplenagens, bem como o ruído e as vibrações durante o decorrer da obra;
- Condições associadas à necessidade de preservação do enquadramento paisagístico e patrimonial do Miradouro: a solução a implementar deveria determinar um impacto mínimo no património existente e permitir a reposição do jardim e do mobiliário urbano e artístico na plataforma inferior.

4 - SOLUÇÕES DE ESTABILIZAÇÃO E DRENAGEM ADOTADAS

As soluções de estabilização adotadas consistiram na execução de cortinas de estacas moldadas, de betão armado (compridas) e de betão simples (curtas), interligadas por contrafortes, formando septos, ao nível da plataforma inferior do Miradouro e seu posterior enchimento com aterros de compensação em agregados leves, contribuindo, assim, para o aumento das condições de estabilidade global da encosta, em particular das áreas correspondentes às plataformas inferior e superior, respetivamente, direta e indiretamente (Figuras 4, 5 e 6). As estacas de betão armado intersectam as potenciais superfícies de deslizamento, previamente identificadas, aumentando a resistência ao corte da superfície de deslizamento. Atendendo a que as estacas acomodam uma parte significativa dos impulsos de terras, esta componente deixará de ser transmitida aos muros de suporte existentes no Miradouro, em particular na transição entre as plataformas inferior e superior, contribuindo, igualmente, para a garantia da sua estabilidade local.

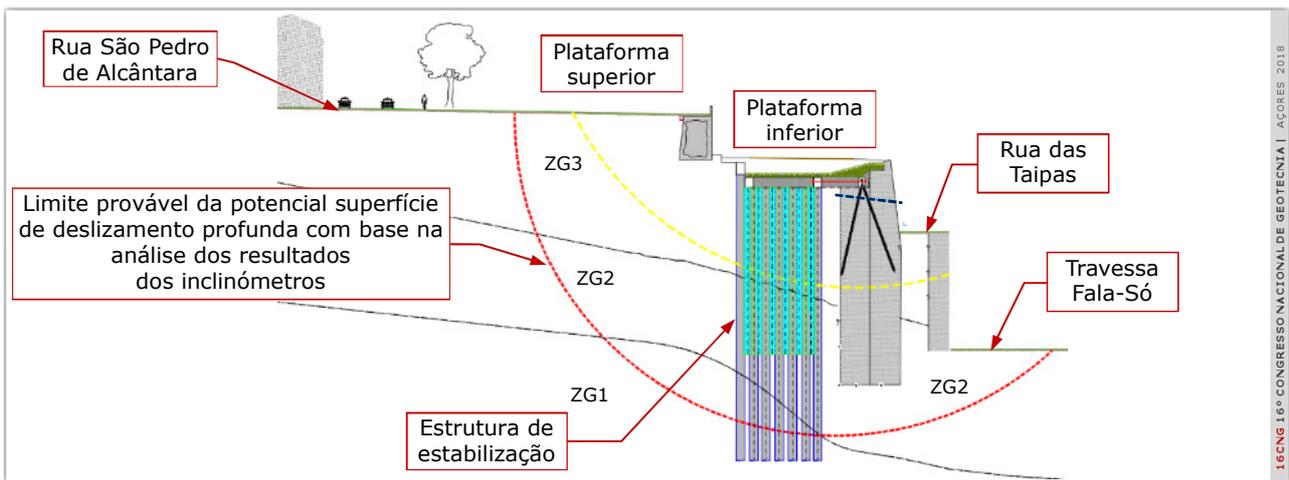


Figura 4 – Secção transversal tipo das soluções de estabilização implementadas

Ao nível da plataforma inferior foram assim executadas duas cortinas de estacas secantes, em betão armado e em betão simples, Ø1000mm, afastadas de 1,6m (entre eixos), interligadas por contrafortes, afastados de 5m, com o mesmo tipo de estacas. O comprimento das estacas foi definido com a preocupação de se garantir, não só que as mesmas ficassem apoiadas num estrato competente (ZG1), mas também de modo a que pudessem vir a intersectar as potenciais superfícies de deslizamento previamente identificadas, tendo por base as leituras das calhas inclinométricas. Para um maior controlo das deformações do muro inferior que vence o desnível da plataforma inferior e a Rua das Taipas, o conjunto de estacas foi atirantado a uma viga de distribuição de betão armado, por sua vez pregada aos contrafortes do referido muro por intermédio de varões sub-verticais, do tipo Gewi Ø32mm, previamente selados com calda de cimento e revestidos com bainhas de proteção em PVC corrugado conferindo dupla proteção contra a corrosão. Para um melhor controlo das deformações os varões que materializam os tirantes foram pré-esforçados.

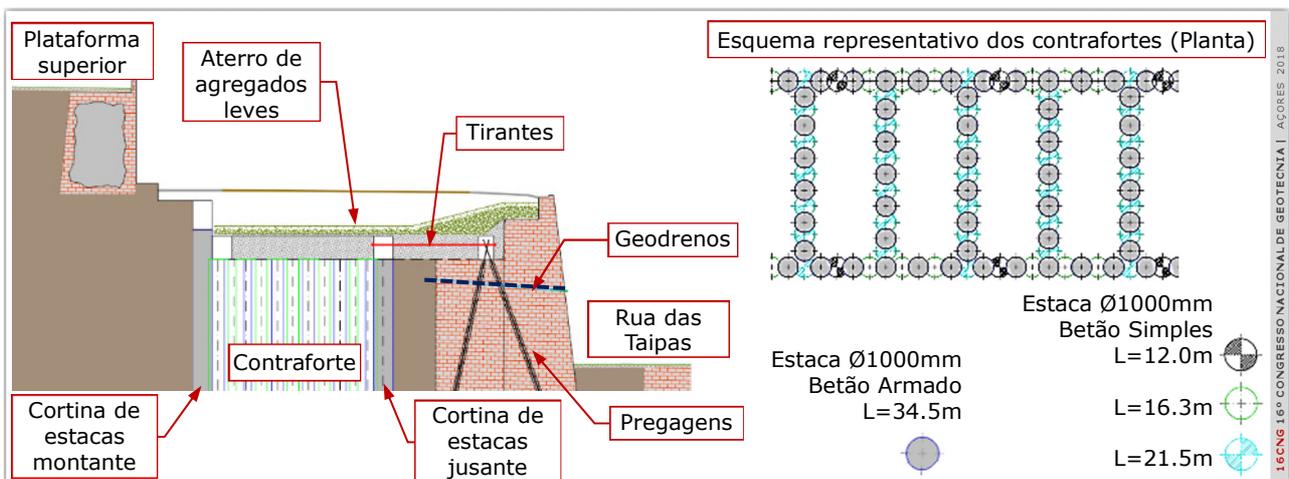


Figura 5 – Corte tipo e planta da solução de estabilização e drenagem implementada

Por fim, a escavação superficial foi aterrada com recurso a agregados leves, do tipo Geoleca 10-20mm, devidamente confinados por manta geotêxtil. A utilização deste tipo de material permitiu, quer a redução do peso na zona instabilizante, aumentando o fator de segurança à estabilidade global da encosta, quer a diminuição da componente de impulso ativo nos muros existentes, traduzindo-se num maior controlo sobre as deformações desta estrutura. O recurso a aterros de agregados leves permitiu ainda incrementar as condições de drenagem geral do Miradouro.

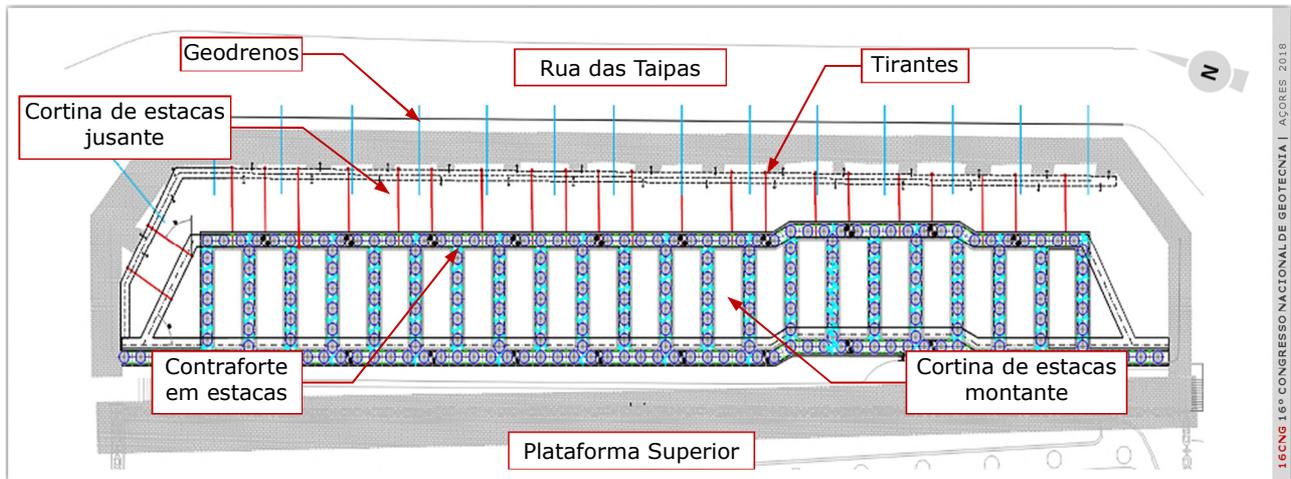


Figura 6 – Planta da solução de estabilização e de drenagem implementada

De modo a possibilitar a captação e drenagem das águas existentes, foram ainda instalados drenos sub-horizontais no muro da plataforma inferior que confronta para a Rua das Taipas, permitindo a minimização dos eventuais efeitos do acréscimo de impulso hidrostático. Os drenos foram materializados por tubos $\varnothing 50\text{mm}$ em PVC, crepinados e canelados, envoltos em geotêxtil e dispoendo de inclinação ascendente de 5° com a horizontal, potenciando o escoamento por gravidade das águas captadas a tardoz do muro, na zona confinada do aterro de agregados leves. A tardoz dos muros que suportam as plataformas superior e inferior, foi ainda instalado um geodreno longitudinal $\varnothing 200\text{ mm}$, em PVC corrugado e crepinado a 240° , envolto em manta geotêxtil, permitindo a condução das águas captadas para o exterior da escavação.

Adicionalmente aos trabalhos de estabilização da encosta, foram ainda realizados trabalhos complementares de reabilitação do muro inferior, que confronta para a Rua das Taipas, sendo de destacar: o fechamento de fendas com recurso a argamassas cimentícias e a reabilitação do paramento superior do muro, incluindo picagem, execução de novo revestimento em reboco e ainda revestimento com tintas plásticas, incluindo igualmente trabalhos acessórios, como a remoção de vegetação existente. Ao nível do paramento revestido a pedra do muro, procedeu-se à sua limpeza e à colmatação de vazios e fendas existentes com recurso a argamassa de cimento e areia.

5 - DIMENSIONAMENTO

A fase inicial do dimensionamento incidiu na retro-análise do comportamento da estabilidade das plataformas e estruturas de suporte existentes no Miradouro de S. Pedro de Alcântara, nomeadamente, aferindo sobre a estabilidade global da encosta. Para tal, procedeu-se à modelação da situação inicial recorrendo-se ao programa de elementos finitos PLAXIS 2D. Na abordagem de cálculo realizada, a encosta e a estrutura de suporte foram assimilados a uma faixa contínua de carregamento, tendo-se utilizado o modelo de elementos finitos em estado plano de deformação. A calibração do modelo geológico e geotécnico foi realizada com o objetivo de tentar reproduzir o perfil de deslocamentos horizontais registados pelos inclinómetros, previamente instalados no local. A magnitude dos deslocamentos observados, coincidentes com uma abordagem de cálculo em condições estáticas, conduziu à formação das superfícies de deslizamento espectáveis, que se indicam na Figura 7 e a que corresponde um fator de segurança ao estado limite último de estabilidade global da encosta de 1,12. Procedeu-se igualmente à aferição do comportamento global da encosta para a ação sísmica, tendo sido verificado que o fator de segurança ao estado imites últimos de estabilidade global da encosta era, para este caso, inferior à unidade. Concluiu-se, portanto, que a situação inicial da encosta não cumpria com os requisitos regulamentares de segurança à estabilidade global perante a imposição das ações sísmicas locais.

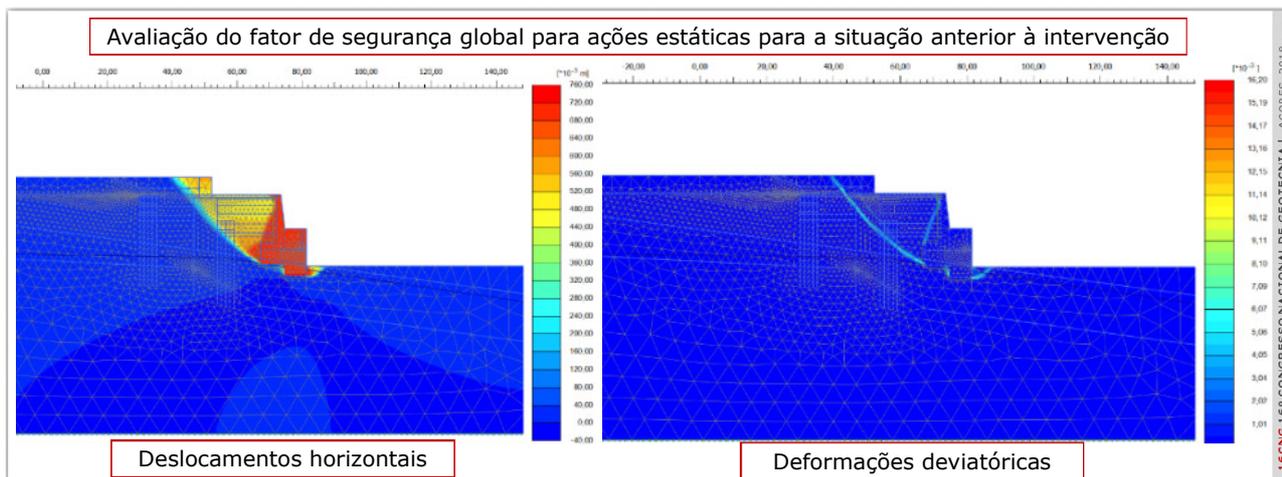


Figura 7 – Análise numérica para avaliação da estabilidade global às ações estáticas [FS=1,12]

A modelação numérica foi igualmente efetuada para a situação após a implementação da solução de estabilização, a qual permitiu o dimensionamento dos elementos de reforço assim como a avaliação do incremento relativo do valor do fator de segurança à estabilidade global para a situação estática e sísmica. O Quadro 1 apresenta, comparativamente, os valores relativos à segurança à estabilidade global antes e após a intervenção.

Quadro 1 - Resumo dos fatores de segurança à estabilidade global anteriores e posteriores à intervenção

Situação	Estática	Dinâmica
Anterior à intervenção	1,12	< 1,00
Após intervenção	1,70	1,25

A apreciação global dos resultados, derivados da implementação da solução proposta, permitiu concluir que esta contribui para um incremento significativo das condições estabilidade do Miradouro de São Pedro de Alcântara, nomeadamente, validando os requisitos normativos de segurança às ações estáticas e, sobretudo, à ação sísmica.

6 - EXECUÇÃO DA OBRA

A montagem do estaleiro, quase integralmente inserido na plataforma inferior do Miradouro, onde se realizaram os trabalhos, determinou a necessidade de uma rigorosa organização e planeamento de todas as atividades. Os trabalhos em obra tiveram início com a execução das estacas e das respetivas vigas de encabeçamento. A grua torre de apoio à obra foi instalada no centro da plataforma, tendo esta sido fundada num maciço apoiado em quatro estacas (ver Figura 8).

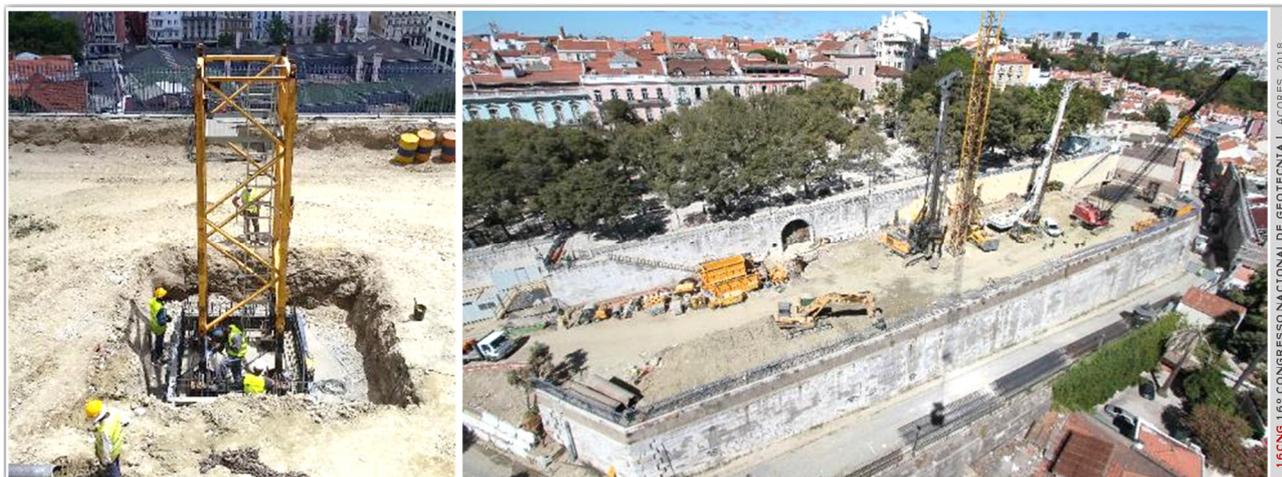


Figura 8 – Vista da instalação da grua no centro da plataforma de trabalho

Durante a execução das estacas foram interstetados materiais muito brandos, assim como restos de construções antigas, o que determinou a necessidade de recurso a várias técnicas de furação e, no último caso, condicionou o rendimento da execução de algumas das estacas. O adequado alinhamento das estacas, essencial à formação da estrutura de estabilização com contrafortes, foi assegurado com recurso à execução de muros guia. Quando os trabalhos de escavação para saneamento da cabeça das estacas foram, igualmente, expostos os contrafortes do muro inferior o que permitiu a determinação do posicionamento das pregagens subverticais a executar posteriormente (ver Figura 9).



Figura 9 – Vista dos trabalhos de execução do muro guia e vista dos contrafortes do muro inferior

Após a execução das estacas, foram realizados os restantes trabalhos, em particular, a execução das vigas de coroamento das estacas, das pregagens e viga de apoio aos contrafortes do muro inferior e dos tirantes de ligação entre estes e a estrutura de estabilização. Todos estes trabalhos exigiram um elevado nível de planeamento, decorrente da disponibilidade de área ao nível de estaleiro e de acesso a equipamentos (ver Figura 10).

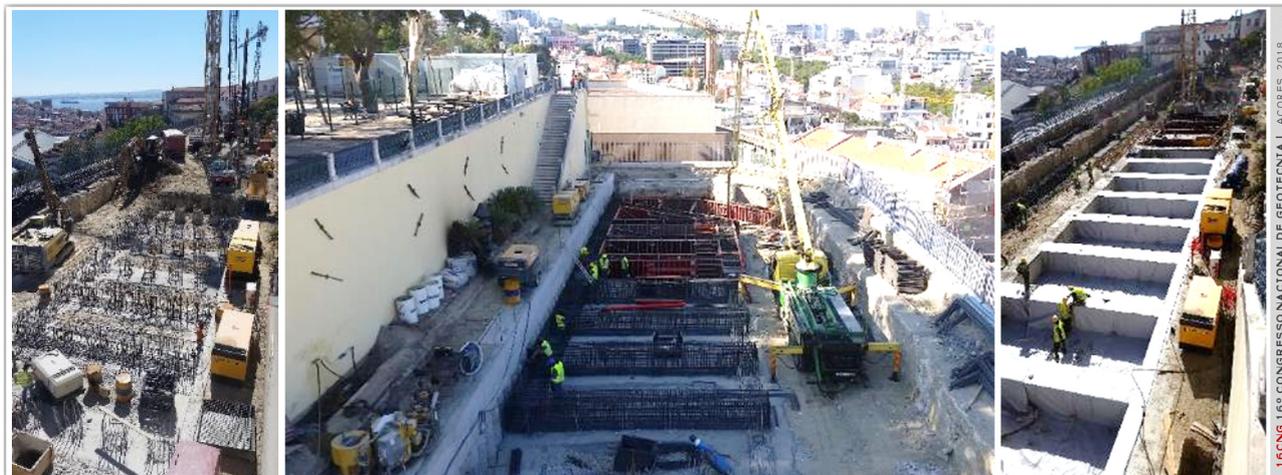


Figura 10 – Vista dos trabalhos de execução das estacas e das vigas de encabeçamento das estacas

Após a execução das vigas de coroamento das estacas, e previamente à aplicação da primeira camada de agregados leves de argila expandida, foi instalada um geotêxtil de separação e filtragem (ver Figura 11). Por sua vez, sobre a primeira camada de aterro de agregados leves, a qual coincidiu com o topo das vigas de coroamento, foi instalada uma membrana impermeabilizante e, sobre esta, aplicada a segunda camada de agregados leves de argila expandida (ver Figura 12).

Os trabalhos ao nível do novo sistema de drenagem incluíram, para além da reabilitação dos sistemas de drenagem existente, a realização de geodrenos no muro inferior, os quais terão como função captar as águas que afluam a tardo do referido muro. A drenagem da plataforma em aterro de agregados leves foi estabelecida com a execução, na base da segunda camada de aterro de agregados leves, de um sistema de captação de águas, composto por bandas drenantes com pendente para encaminhamento das águas para o sistema de drenagem existente.



Figura 11 – Vista da aplicação da primeira camada de aterro de agregados leves

Dados os condicionamentos associados ao enquadramento paisagístico, a solução implementada considerou a necessidade de posterior reposição do jardim e do mobiliário urbano sobre a plataforma intervencionada. Deste modo, a camada de agregados leves foi aplicada até uma cota inferior à da plataforma anteriormente existente, permitindo, assim, a aplicação de um recobrimento em solo vegetal, necessário à replantação da vegetação. Como já foi referido, intervenção terminou com a limpeza e reabilitação do muro inferior, confrontante com a Rua das Taipas, incluindo a reparação das fissuras existentes.



Figura 12 – Vista da plataforma inferior e do respetivo muro inferior na fase final de intervenção

Destaca-se o facto de, apesar das dificuldades essencialmente encontradas ao nível do rendimento de execução das estacas, terem sido cumpridos o prazo e o orçamento previsto para a generalidade dos trabalhos. À data da redação do presente artigo encontram-se ainda por realizar os trabalhos relativos à execução/reposição do jardim da plataforma inferior, uma vez que os mesmos transitaram para uma empreitada independente.

7 - INSTRUMENTAÇÃO E OBSERVAÇÃO

Como já referido, antes, durante e após a execução da obra, foram instalados e reinstalados diversos aparelhos que têm permitido e irão permitir a continuação da monitorização do comportamento do Miradouro, confirmando-se como ferramentas fundamentais na validação da eficácia das soluções de reforço e de drenagem implementadas e, em consequência, na gestão das condições de segurança e estabilidade do Miradouro. Atualmente, o sistema de instrumentação é composto por um conjunto de alvos topográficos instalados nos muros, incluindo o muro de suporte situado entre a Rua das Taipas e a Travessa Fala-Só, e também por um conjunto de inclinómetros e piezómetros, apresentando-se a nível esquemático a seu posicionamento e referencial de leitura na Figura 13.

Os inclinómetros e piezómetros permitiram avaliar as deformações horizontais em profundidade e a medição do nível de água, respetivamente. Por sua vez, a instrumentação topográfica permite a medição dos deslocamentos tridimensionalmente, avaliando assim eventuais deformações dos muros.

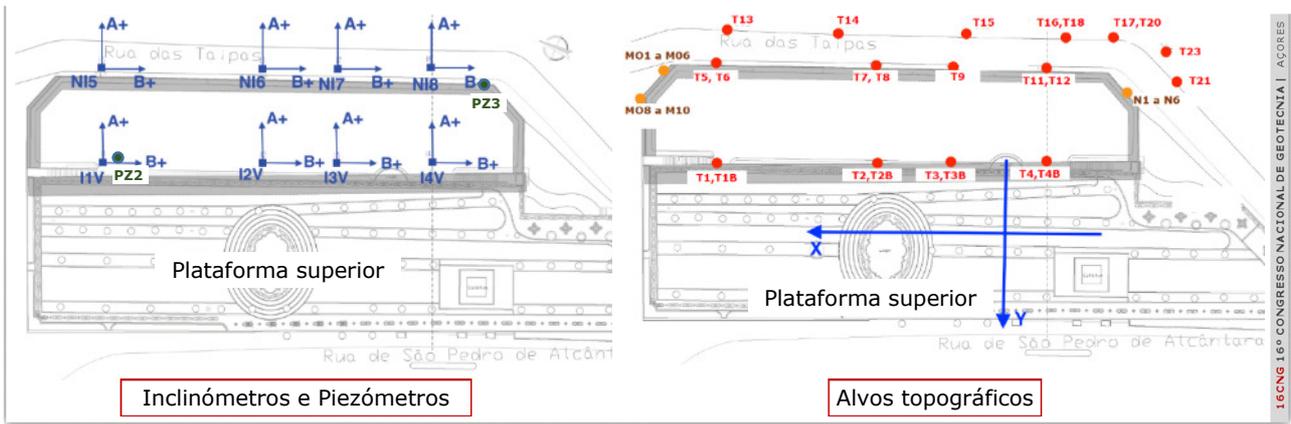


Figura 13 – Planta dos dispositivos atualmente instalados em monitorização

A Figura 14 apresenta a vista do posicionamento de alguns dos alvos topográficos, alguns já instalados anteriormente à intervenção e outros instalados antes do início dos trabalhos, os quais se mantiveram como dispositivos de monitorização futura, sempre que foi possível. Estes alvos não foram alvo de zeragem após o término dos trabalhos, permitindo, assim, uma avaliação do registo dos movimentos contínua e cumulativa. A intervenção de limpeza e de reabilitação do muro inferior foi ainda condicionada pela manutenção da integridade destes dispositivos.

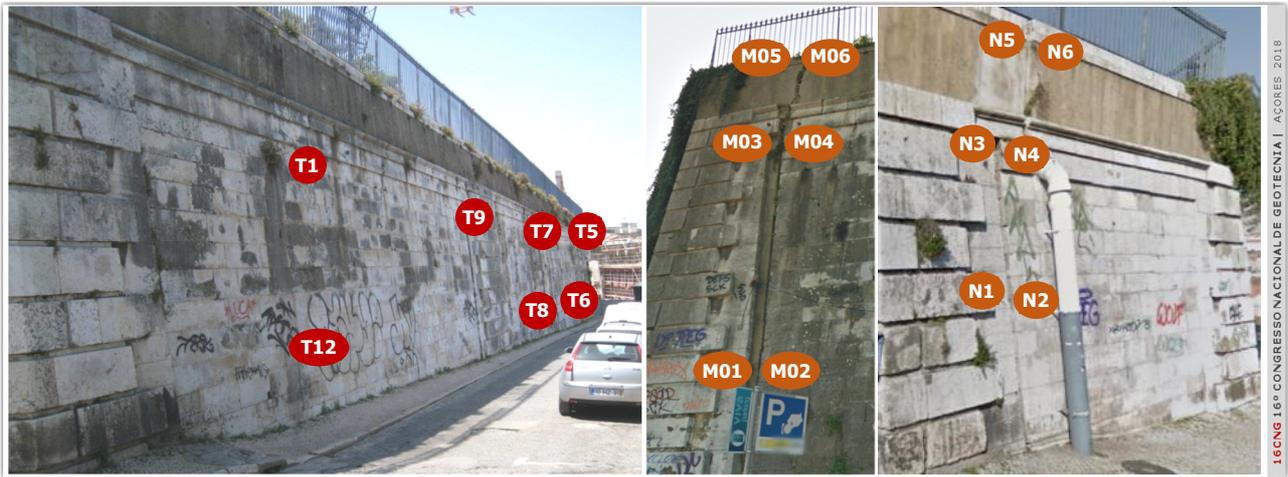


Figura 14 – Vista do posicionamento de alguns dos alvos topográficos atualmente instalados e monitorizados

A frequência das leituras da instrumentação atualmente em fase quinzenal, encontra-se prevista com esta periodicidade durante os primeiros quatro meses após a conclusão da intervenção, devendo posteriormente, durante os 6 meses subsequentes, ser efetuada com periodicidade mensal. Da análise dos resultados, até à data, confirma-se uma estabilização geral dos movimentos após a conclusão da intervenção no final de outubro de 2017 (Figura 15).

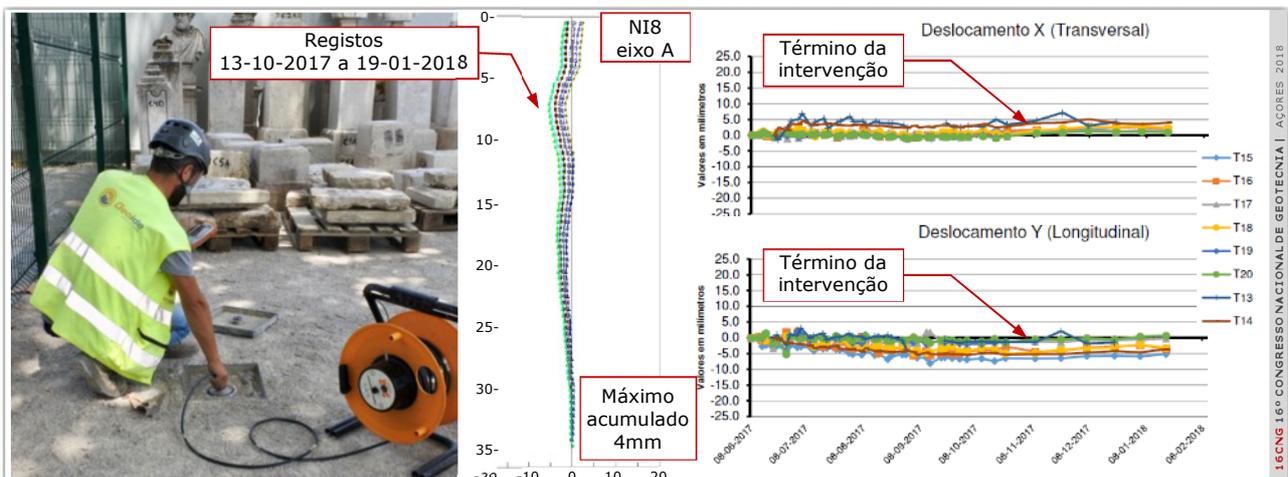


Figura 15 – Vista da leitura e registo de movimentos de um dos inclinómetros e de alguns dos alvos topográficos

8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente artigo é descrito um caso de obra em que, uma vez mais, é confirmada a importância da monitorização e observação como ferramenta fundamental na gestão do risco geotécnico de uma encosta com vários episódios de instabilidade, localizada numa zona histórica e muito sensível do centro da cidade de Lisboa.

Neste enquadramento, destaca-se o fato das soluções implementadas terem sido concebidas e executadas, respeitando vários condicionamentos, de elevado grau de exigência, dos quais se podem destacar:

- a) Acessibilidades de equipamentos muito condicionada, associadas à limitação da área de estaleiro apenas à zona da intervenção, correspondente à plataforma inferior do Miradouro. Refere-se que a plataforma superior do Miradouro praticamente não foi afetada pela intervenção e que apenas foi cortada ao tráfego o troço inicial da Rua das Taipas;
- b) Necessidade de minimização do volume de terraplenagens, em particular de escavações, o que determinaria uma circulação de camiões na zona adjacente à obra, que iria condicionar seriamente o tráfego automóvel e pedonal na zona;
- c) Necessidade de se garantir um reduzido impacto visual, privilegiando a preservação do património arquitetónico existente. Saliencia-se que a solução ficará totalmente oculta, sem impacto visual (ver Figura 16);
- d) Necessidade de reposição, de forma o mais fiel possível, do jardim e do mobiliário urbano e artístico pré-existente na plataforma inferior do Miradouro (ver Figura 16).

Por último, e não menos importante, salienta-se a execução dos trabalhos de estabilização e drenagem respeitando o prazo e o orçamento inicialmente previstos.

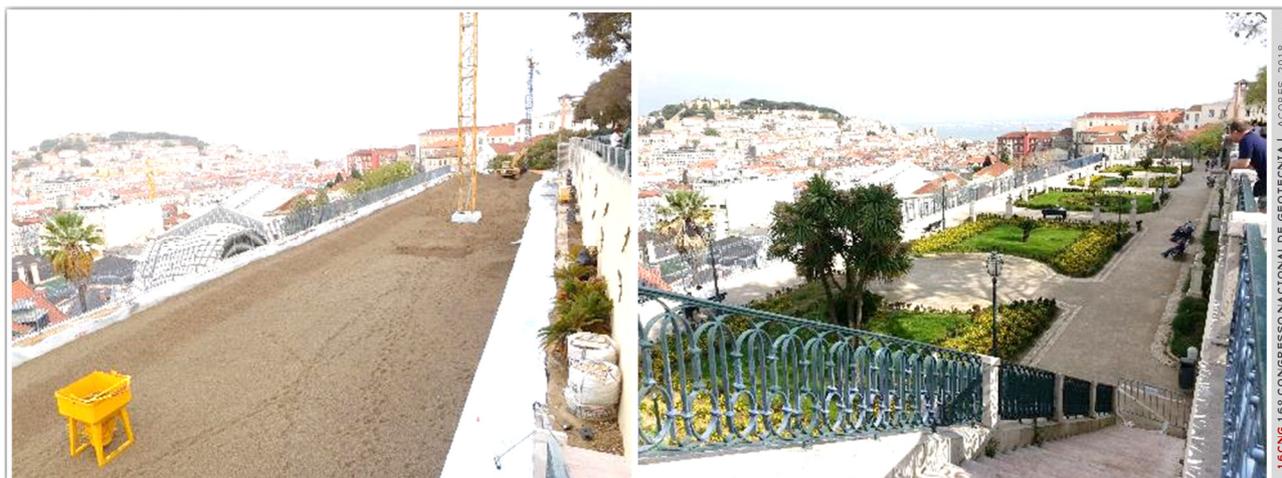


Figura 16 – Vista do miradouro no final da intervenção (esquerda) e vista do miradouro anterior à intervenção determinando a reposição do jardim e mobiliário urbano conforme a sua pré-existência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Câmara Municipal de Lisboa, na qualidade de Dono da Obra e que assegurou igualmente a Fiscalização dos trabalhos, a autorização para a redação do presente artigo.

REFERÊNCIAS

- Pinto, A., Cardoso, D. e Lopes, H. (2007) - Stabilization of Landslides in the Lisbon Volcanic Complex. *11th Congress ISRM, Proceedings of the International Workshop on Volcanic Rocks, Workshop W2, Taylor & Francis Group*, pp. 169-174, Açores. Portugal.
- Pinto, A. e Pereira, A. (2016) - Slope Stabilization at the National Road EN115, close to Bucelas, Portugal. *3rd International Conference on Transportation Geotechnics*, Guimarães, Portugal.
- Pinto, A. e Tomásio, R. (2016) - Slope Stabilization at São Marcos Road, Calhandriz, Portugal. *3rd International Conference on Transportation Geotechnics*, Guimarães, Portugal.