

DRONES COMO FERRAMENTA COMPLEMENTAR NA SEGURANÇA DE BARRAGENS DE ATERRO

Drones as a complementary tool for embankment dam safety

Daniel Leite^{a, b, c}, João Marcelino^b, Nuno Guerra^a, João Manso^b

^a Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

^b Departamento de Geotecnia, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

^c Departamento de Barragens de Aterro, COBA, Consultores de Engenharia e Ambiente, Portugal.

RESUMO – As barragens de aterro são estruturas vitais para a sociedade, porém a sua operação pode envolver riscos elevados. Os métodos tradicionais de monitorização são fundamentais na segurança de barragens, no entanto, podem apresentar limitações operacionais, como pontos cegos, sistemas obsoletos e inoperacionais. Este trabalho propõe uma metodologia complementar, baseada em drones, para apoio à deteção precoce de anomalias nestas estruturas. Apresenta diretrizes técnicas para planeamento de voo otimizado e processamento fotogramétrico com recurso a software de código aberto (*WebODM*). Apresenta ainda a ferramenta *GCP Finder* para automatização da georreferenciação de pontos de controlo. O caso de estudo apresentado, da Barragem da Lapa, demonstra a capacidade de deteção de anomalias com resolução sub-centimétrica, permitindo quantificar deformações de 15–20 mm no coroamento. Os resultados confirmam o potencial dos drones como ferramenta emergente na segurança de barragens, oferecendo cobertura integral de baixo custo.

ABSTRACT – Embankment dams are vital structures for society; however, their operation may involve significant risks. Traditional monitoring methods are fundamental for dam safety, yet they may present operational limitations, such as blind spots, obsolete systems, and inoperative equipment. This work proposes a complementary methodology based on drones to support the early detection of anomalies in these structures. It provides technical guidelines for optimised flight planning and photogrammetric processing using open-source software (*WebODM*). It also introduces the *GCP Finder* tool for automating the georeferencing of control points. The case study of the Lapa Dam demonstrates the ability to detect anomalies with sub-centimetre resolution, enabling the quantification of deformations of 15–20 mm on the crest. The results confirm the potential of drones as an emerging tool for dam safety, offering comprehensive coverage at low cost.

Palavras Chave – drones, segurança de barragens, deteção de anomalias.

Keywords – drones, dam safety, anomaly detection.

1 – INTRODUÇÃO

As barragens constituem infraestruturas de importância estratégica para a sociedade, desempenhando funções essenciais no abastecimento hídrico, na produção de energia hidroelétrica,

E-mails: d.leite@campus.fct.unl.pt (D. Leite), marcelino@lnec.pt (J. Marcelino), nguerra@fct.unl.pt (N. Guerra), jmanso@lnec.pt (J. Manso)

ORCID: orcid.org/0000-0003-4753-5582 (D. Leite), orcid.org/0000-0001-5285-3898 (J. Marcelino), orcid.org/0000-0001-8380-9902 (N. Guerra), orcid.org/0000-0003-1655-8343 (J. Manso)

no controlo de cheias e na gestão de resíduos provenientes da atividade mineira. Não obstante os seus inequívocos benefícios socioeconómicos, estas estruturas apresentam riscos consideráveis, podendo originar consequências catastróficas em caso de acidente, nomeadamente a perda de vidas humanas, impactos socioeconómicos severos nas comunidades locais e danos ambientais irreversíveis, conforme abordado pelo ICOLD (2019).

De acordo com Ho et al. (2025), o aquecimento global tem contribuído para a intensificação dos caudais fluviais, decorrente do aumento da frequência e magnitude de eventos climáticos extremos, designadamente precipitações torrenciais e processos de degelo acelerado. Estas alterações hidrológicas elevam significativamente o risco de acidentes em barragens, particularmente naquelas cujo dimensionamento foi efetuado sem considerar as atuais mudanças climáticas. Estes aspetos também foram abordados por Sergio et al. (2025), especialmente no que se refere às barragens de conceção mais antiga, não projetadas para suportar os picos de caudal e a variabilidade climática intensificada que atualmente se verifica, exercendo pressão acrescida sobre as estruturas e os sistemas de drenagem. Esta conjuntura evidencia que a problemática da segurança de barragens é dinâmica e encontra-se em agravamento, exigindo soluções de monitorização mais adaptativas e robustas. Outro aspeto crítico na segurança de barragens reside no intervalo temporal entre a deteção de uma anomalia e a eventual falha. Registos históricos demonstram que este período pode ser notavelmente reduzido, como no caso da Barragem de Teton (nos EUA, em 1976), que rompeu aproximadamente duas horas após a deteção de ressurgências (Wallace et al., 1976); a Barragem da Pampulha (no Brasil, em 1954) colapsou em cerca de 48 horas; a Barragem de Big Bay Lake (nos EUA, em 2004) em aproximadamente 24 horas (Ferguson et al., 2014); e a Barragem B1 de Brumadinho (no Brasil, em 2019) que, embora apresentasse problemas de drenagem há 24 anos, sofreu uma rotura quase instantânea por liquefação (CIAEA, 2020). Esta janela temporal reduzida sublinha a importância crítica da deteção precoce, exigindo que os métodos de monitorização sejam capazes de identificar problemas incipientes antes que atinjam um limiar crítico para intervenção.

No que se refere a monitorização para a deteção destas anomalias em barragens de aterro, tradicionalmente o desempenho hidráulico-estrutural destas estruturas fundamenta-se na supervisão de grandezas como deformações, caudais percolados e níveis piezométricos, todas relacionadas com o comportamento mecânico e hidráulico da barragem, e em última análise com a segurança. As deformações são frequentemente monitorizadas através de marcos de superfície, inclinómetros e extensómetros, enquanto os caudais são controlados mediante medidores de caudal conjugados com piezómetros. Complementarmente, as inspeções visuais desempenham um papel fundamental na avaliação do estado de conservação da estrutura e na identificação de possíveis anomalias, tais como infiltrações, assentamentos, fissuras e subsidências (Quintela et al., 2001; Silveira 2006). Contudo, estes métodos convencionais apresentam limitações operacionais que podem comprometer a deteção e correção atempada de anomalias, devido aos seguintes fatores:

- **Limitações espaciais dos dispositivos de observação:** monitorizar todas as zonas da barragem onde podem ocorrer anomalias, pode ser impraticável devido a natureza pontual da instrumentação, podendo existir "pontos cegos" na monitorização, pois os dispositivos tradicionais fornecem dados exclusivamente em pontos específicos, limitando tanto a compreensão do comportamento global da estrutura quanto a deteção de anomalias localizadas fora dos pontos de medição ou em áreas de difícil acesso (ICOLD, 2018).
- **Sistemas de observação obsoletos e/ou inoperacionais:** muitas barragens, especialmente as de conceção mais antiga, associadas a menores recursos financeiros, possuem sistemas de monitorização limitados, obsoletos ou inoperacionais. Os critérios de segurança vigentes à época do projeto e construção nem sempre dispunham do rigor atual, e os sistemas estão sujeitos a deterioração ao longo do tempo, aumentando o risco de acidentes ou incidentes (Silveira, 2006).
- **Dificuldade de diagnóstico preciso e atempado:** em situações de emergência, se os dispositivos não estiverem operacionais ou se a sua localização não for adequada à deteção

do fenómeno em curso, pode verificar-se dificuldade em realizar um diagnóstico preciso e atempado, comprometendo a implementação de medidas de mitigação. A incapacidade de obter dados fiáveis e contínuos nestes "pontos cegos" ou com frequência suficiente impede uma avaliação quantitativa e proactiva dos riscos (Cruz, 1996).

- **Inspecções visuais subjetivas:** embora essenciais, as inspecções visuais podem ser subjetivas a cada inspetor, e as anomalias podem passar despercebidas devido à experiência do técnico, bem como às dificuldades de acesso ou à ausência de dispositivos de observação nas zonas em causa (Quintela et al., 2001).

Perante as lacunas dos métodos tradicionais, o presente trabalho pretende apresentar uma tecnologia emergente através da realização de inspecções com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), popularmente designados por drones, complementar aos métodos tradicionais de observação, contribuindo para o aumento da resiliência e segurança destas estruturas através da identificação precoce de anomalias em barragens de aterro.

Neste sentido, o uso de drones na segurança de barragens de aterro apresenta vantagens, como a possibilidade de obtenção de modelos tridimensionais representativos da geometria e estado de conservação atual das barragens de aterro, além de permitirem o acesso rápido e seguro a áreas de difícil acesso, eliminando a necessidade de expor trabalhadores a situações de perigo. Conforme relatado por Guidicini et al. (2021), no caso da barragem da Pampulha, em Belo Horizonte, após 16 anos de operação, a rotura da barragem veio a ocorrer em 18 de abril de 1954, devido a ocorrência de erosão interna. A anomalia identificada foi uma ressurgência no pé de jusante. A Figura 1a apresenta uma inspeção visual, colocando em perigo os seus intervenientes, realizada pelas autoridades brasileiras no local da ressurgência, que evoluiu rapidamente, num período de cerca de 48 horas, entre a deteção da anomalia e a rotura da barragem, conforme apresentado na Figura 1b.



Fig. 1 – Rotura da Barragem da Pampulha (18/04/1954) (Guidicini et al., 2021).

Em contraste com o caso supracitado, a Figura 2 apresenta um exemplo de um talude com cerca de 40 m de altura, onde foram identificadas fissuras e deslizamentos. Esta imagem foi obtida a partir de um modelo 3D gerado através do processamento de uma nuvem de pontos criada com base em imagens captadas por drone. Foi possível identificar e cartografar as anomalias em aproximadamente 40 minutos, sem colocar os técnicos em risco, com a vantagem de se obter uma descrição precisa da geometria e das características das anomalias (Leite et al., 2024).



Fig. 2 – Inspeção aérea em zona de alto risco
(imagem extraída de um modelo 3D texturizado, gerado a partir de imagens capturadas por drone).

Contudo, embora o uso de drones ofereça inúmeras vantagens, essa prática exige cuidados específicos para assegurar elevada precisão e qualidade adequada para as análises, fatores essenciais para a detecção precoce de anomalias em barragens de aterro. É nesse contexto que este artigo apresenta, em detalhe, as especificações técnicas e a metodologia proposta para a execução eficaz de inspeções e mapeamento aéreo. A Secção 2 aborda as especificações técnicas de drones adequados para a segurança de barragens, discutindo os requisitos de equipamento e sensores necessários para este tipo de aplicação. A Secção 3 centra-se nas considerações sobre mapeamento com drones, explorando as estratégias de planeamento e execução de missões aéreas para uma inspeção eficaz. Complementarmente são identificados e caracterizados os modos de falha passíveis de mapeamento através de levantamento aéreo com drones, estabelecendo a relação entre as anomalias detetáveis e as tecnologias de mapeamento aéreo. A Secção 4 apresenta uma análise dos softwares de código aberto disponíveis para o pós-processamento dos dados recolhidos, avaliando as suas funcionalidades e aplicabilidade. A Secção 5 desenvolve um estudo de caso prático, demonstrando a implementação da metodologia proposta numa situação real. Por fim, a Secção 6 apresenta as considerações finais, sintetizando os principais resultados e perspetivas futuras desta área de investigação.

2 – ESPECIFICAÇÕES DE DRONES PARA A SEGURANÇA DE BARRAGENS

O mercado atual oferece uma ampla variedade de drones com especificações e preços diversificados, desde equipamentos básicos de algumas dezenas de euros até sistemas profissionais que custam milhares de euros. Esta diversidade inclui drones de asa fixa e multi-rotor, equipados com diferentes tipos de câmaras, sistemas de georreferenciação de alta precisão e sensores especializados como câmaras térmicas e LiDAR. Acresce que se trata de uma tecnologia em permanente evolução.

Para aplicações específicas como o mapeamento de anomalias em barragens de aterro, a seleção adequada do equipamento torna-se fundamental. As barragens de aterro apresentam desafios únicos: podem estender-se por vários quilómetros de comprimento e atingir dezenas de metros de altura, exigindo equipamentos capazes de identificar deslocamentos frequentemente milimétricos, mantendo simultaneamente eficiência na cobertura de grandes áreas.

2.1 – Considerações sobre o GSD

O “Ground Sampling Distance” (GSD) representa a dimensão real no solo correspondente a um pixel na imagem obtida pelo sensor do drone. Em termos práticos, o GSD determina o nível de detalhe que a câmara é capaz de registar. Para deteção de fissuras de cerca de 1 mm, por exemplo, é necessário que o GSD seja inferior a 0,1 cm/pixel, conforme ilustrado na Figura 3 (Farah e Alruwaili, 2024).

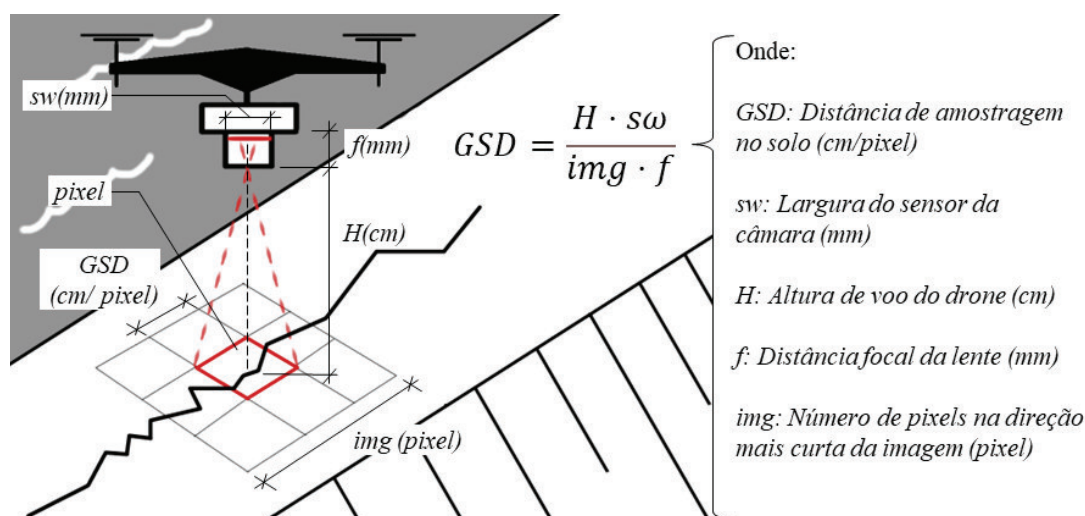


Fig. 3 – Ilustração do cálculo do GSD.

Deste modo, a melhoria do GSD pode ser conseguida através de três abordagens principais:

- Redução da altitude operacional: Método mais direto, mas implica aumento exponencial do número de fotografias necessárias.
- Utilização de sensores de maior resolução: Permite subdivisão mais refinada da informação espacial.
- Implementação de objetivas de maior distância focal: Proporciona efeito de aproximação mantendo os restantes parâmetros constantes.

É relevante notar que sistemas com sensores de resolução aparentemente inferiores, podem produzir imagens de elevada qualidade espacial, quando operados a baixas altitudes ou com uma

boa distância focal. Assim, para se detetar anomalias em barragens de aterro, com feições milimétricas é necessário um planeamento de voo com uma altura adequada e com um drone que possua uma câmara apropriada que garanta o GSD desejado. Neste sentido o diagrama apresentado na Figura 4, mostra a relação entre o GSD, Número de Fotos/ha² e a Altura de Voo para diferentes tipos de drones.

Verifica-se que o número de fotos necessários para se mapear 1 ha² (linhas contínuas), aumenta à medida que o GSD diminui. Este acréscimo do número de fotos pode inviabilizar o processamento das imagens a depender dos recursos computacionais disponíveis. Recomenda-se um limite de 600 fotos/ha², ou seja, para este limite, o GSD alcançado para os diferentes tipos de drones, pode variar entre 0,20 a 0,40 cm/pixel (ver linha dupla a vermelho, apresentada na Figura 4).

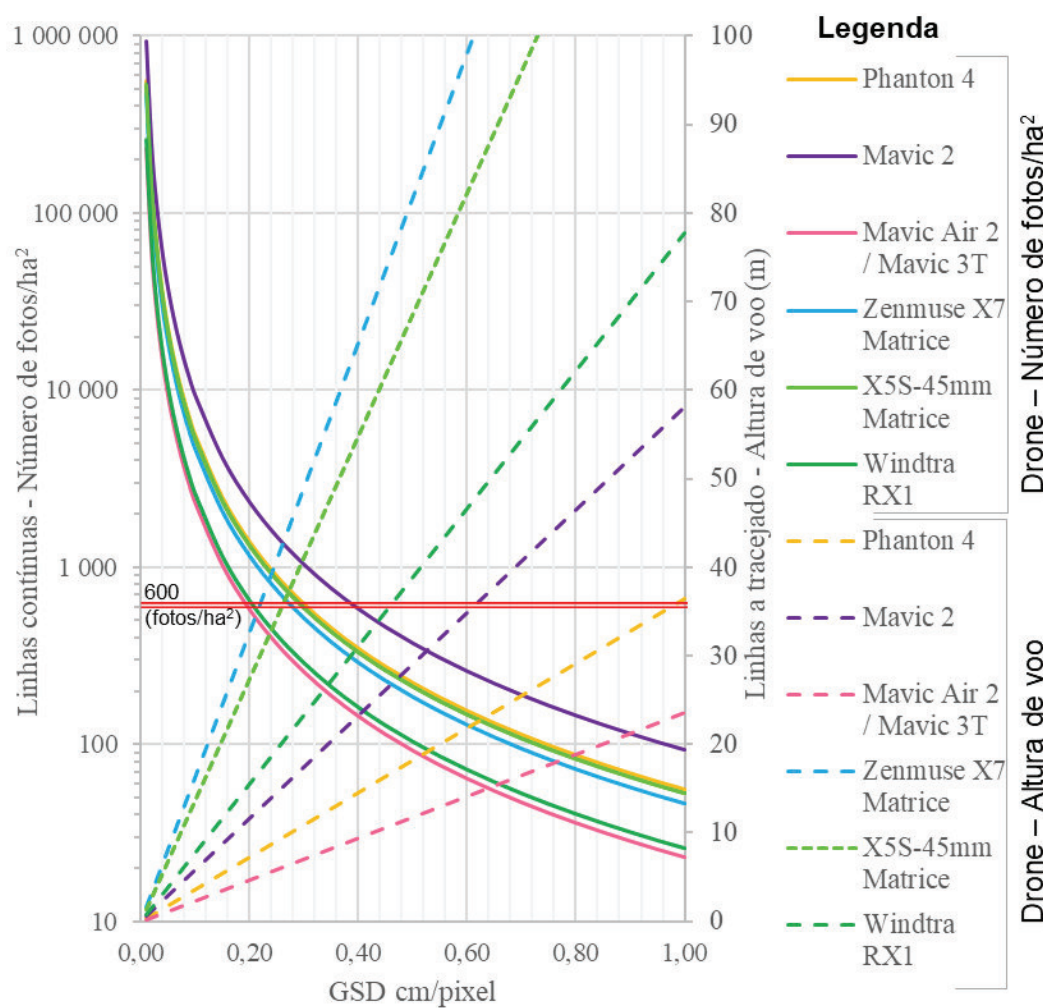


Fig. 4 – Relação entre o GSD, Número de Fotos/ha² e a Altura de Voo.

Verifica-se ainda, que para a gama de GSD (0,20 a 0,40 cm/pixel) a altura do voo pode ser um fator limitante. Conforme se observa na Figura 4, os drones Mavic Air 2 e Mavic 3T alcançam o GSD de aproximadamente 0,20 cm/pixel no limite de 600 fotos/ha². No entanto, a altura de voo observada (nas linhas a tracejado a cor de rosa) é de aproximadamente 11 m. Esta altura de voo pode colocar o drone em risco de colisão, especialmente para voos autónomos.

Deste modo, recomenda-se a realização de voos a baixa altura, somente nas zonas mais críticas e com maior interesse em termos da verificação da segurança da barragem, como o coroamento, zonas onde se identificam anomalias nos maciços e/ou zonas adjacentes.

2.2 – Considerações sobre configurações mínimas

Além de um GSD adequado, os drones utilizados em inspeções em barragens de aterro devem atender a requisitos mínimos que assegurem eficiência, segurança e compatibilidade com o ambiente de operação:

- Alcance: mínimo de 5 km, considerando a extensão das barragens.
- Resistência ao vento: drones com resistência inferior a 10 m/s apresentam limitações operacionais em condições adversas.
- Autonomia: recomenda-se autonomia mínima de 30 minutos por bateria.
- Compatibilidade com software de voo autónomo: fundamental para planeamento e execução de missões. Deve-se verificar a compatibilidade com soluções como *DroneDeploy*, *Pix4D*, *Dronelink*, *DroneHarmony*, entre outras.

Adicionalmente, algumas características opcionais são altamente recomendáveis:

- RTK (*Real-Time Kinematic*): Sistema de melhoramento do georreferenciamento que aumenta significativamente a precisão do posicionamento, podendo reduzir ou eliminar a necessidade de pontos de controlo no solo.
- LiDAR: permite gerar Modelos Digitais do Terreno (MDT) de alta precisão, mesmo sob cobertura vegetal densa.
- Câmara multiespectral: capta bandas não visíveis ao olho humano, permitindo identificar áreas com alterações de vegetação ou humidade, indicadores importantes de possíveis anomalias.
- Câmara térmica (infravermelhos): permite detetar zonas com variações térmicas associadas a infiltrações, fugas ou zonas saturadas.

3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A EXECUÇÃO DO MAPEAMENTO COM DRONES

3.1 – Enquadramento legal

Antes da realização dos mapeamentos aéreos com drones é fundamental a obtenção das autorizações e certificações necessárias para este efeito. O regime jurídico aplicável à operação de drones em Portugal fundamenta-se no quadro normativo da União Europeia, estabelecido pela Agência Europeia para a Segurança da Aviação (EASA) e implementado nacionalmente pela Autoridade Nacional da Aviação Civil (ANAC), complementado pelos Decretos-Lei n.º 58/2018 e n.º 87/2021. Este enquadramento regulamentar, estabelece um sistema hierárquico de obrigações que inclui o registo obrigatório na plataforma eletrónica da ANAC, para operadores de drones com massa superior a 250 gramas ou equipados com sensores de captação de dados pessoais, bem como a contratação imperativa de seguro de responsabilidade civil para aeronaves com massa superior a 900 gramas, conforme estipulado na Portaria n.º 2/2021. Adicionalmente, exige-se que o piloto remoto possua formação certificada adequada à subcategoria operacional (A1, A2 ou A3) e ao tipo de operação pretendida, garantindo assim a competência técnica necessária para a execução segura das missões.

A operacionalização de levantamentos aéreos para monitorização de barragens enquadra-se frequentemente em operações que transcendem os limites da Categoria Aberta, exigindo autorização específica da ANAC através de Declaração de conformidade com Cenários Padrão (STS) ou Avaliação de Risco Operacional (SORA), acompanhada de documentação técnica pormenorizada.

Paralelamente, qualquer atividade de captação de imagens aéreas com finalidades comerciais ou técnicas, como mapeamentos topográficos ou modelação tridimensional, requer autorização prévia da Autoridade Aeronáutica Nacional (AAN), devendo incluir a descrição detalhada da área a sobrevoar, os objetivos específicos da missão e o cronograma operacional.

3.2 – Orientações para o planeamento de voo

O planeamento de voo constitui uma etapa fundamental no mapeamento aéreo com drones, devendo abranger integralmente a estrutura da barragem e as áreas adjacentes, com particular atenção às zonas críticas onde existe maior probabilidade de ocorrência de anomalias. Nestas áreas específicas, torna-se essencial priorizar o GSD, ajustando criteriosamente a altitude de voo em função da dimensão das anomalias a detetar.

Este planeamento é efetuado recorrendo a aplicações compatíveis com o modelo de drone utilizado, disponíveis tanto para computador como para dispositivos móveis. Estas aplicações permitem a configuração de missões autónomas através da definição de parâmetros específicos, nomeadamente altitude, sobreposição de imagens, área de cobertura e trajetória de voo, destacando-se as seguintes soluções:

- **DroneDeploy**: plataforma gratuita destinada ao planeamento e execução de voos, que oferece sincronização móvel/web e modos especializados (*Field, Terrain, Building, Crosshatch*) (DroneDeploy, 2025).
- **Pix4D**: solução gratuita integrada para captura, planeamento e processamento, com ajuste automático de altitude mediante o Modelo de Superfície do Terreno e suporte a RTK (Pix4D, 2025).
- **Dronelink**: plataforma comercial que disponibiliza automação avançada, reutilização de missões e programação visual (Dronelink, 2025).
- **Drone Harmony**: plataforma por subscrição orientada para inspeções complexas, oferecendo adaptação automática ao terreno e visualização 3D (DroneHarmony, 2025).

Antes da seleção de um drone para a realização de mapeamentos é altamente recomendável a verificação da compatibilidade do mesmo com as plataformas de planeamento de voo autónomo, bem como a compatibilidade com o dispositivo móvel a ser utilizado para este efeito. Para o presente trabalho, recorreu-se a aplicação *DroneDeploy*, em virtude da sua robustez, comunidade ativa e extensa documentação técnica disponível. O drone utilizado foi o Phantom 4, cujas configurações na aplicação são, em grande medida, comuns a outros modelos, variando principalmente a altitude necessária para garantir o mesmo GSD, o número de imagens e a quantidade de baterias requeridas para cobrir a área de interesse.

A estratégia de mapeamento deve distinguir entre diferentes tipos de anomalias: processos erosivos requerem, em geral, modelos com resolução centimétrica ou métrica, ao passo que a identificação de fissuras sub-centimétricas exige voos executados a altitudes muito reduzidas. Estes voos de baixa altitude geram, como se referiu, um número elevado de imagens, incrementando significativamente a exigência computacional do processamento fotogramétrico subsequente.

Desta forma, o planeamento de voo deve ser equilibrado de modo a garantir uma cobertura geral da estrutura com um GSD compreendido entre 4 e 2 cm/pixel, assegurando simultaneamente que nas zonas críticas seja alcançada uma resolução espacial mais elevada, situada entre 2 e 0,2 cm/pixel. Esta abordagem permite otimizar a eficiência operacional sem comprometer a qualidade da deteção de anomalias nas áreas de maior interesse.

Como observado na Figura 5, um plano de voo executado a 90 metros de altitude permite o mapeamento de uma área relativamente extensa. Contudo, o GSD obtido neste levantamento resulta em uma resolução espacial de 3,8 cm/pixel, limitando a capacidade de identificação de patologias de menor dimensão. Por sua vez, a Figura 6 apresenta a área do coroamento, realizada com um GSD

da ordem de 0,4 cm/pixel (apesar do software mostrar um GSD de 1 cm/pixel, este é menor, ver diagrama apresentado anteriormente na Figura 4), facilitando significativamente a identificação de patologias menores. Já a Figura 7 propõe uma configuração de voo cruzado, visando aumentar a densidade da nuvem de pontos e aprimorar tanto a resolução espacial quanto a precisão do levantamento.

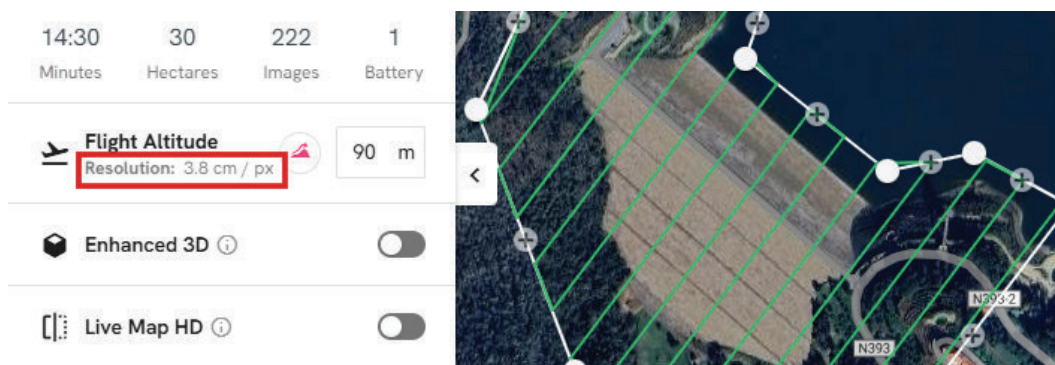


Fig. 5 – *DroneDeploy* - Definição da altitude de voo e GSD

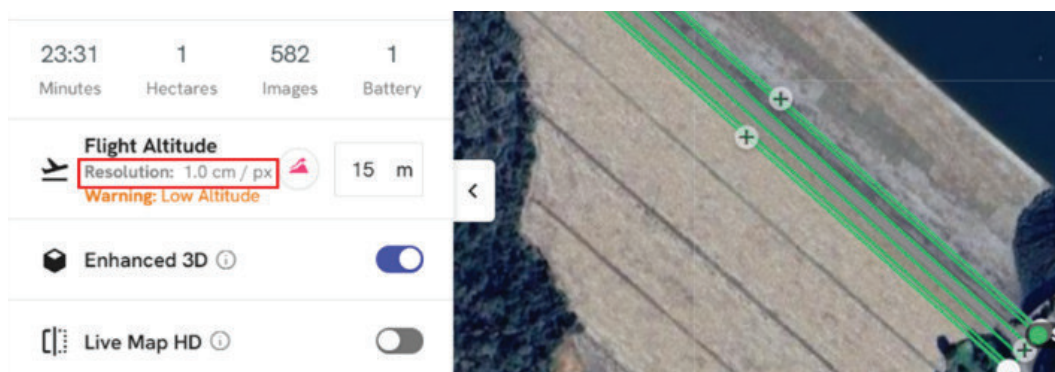


Fig. 6 – *DroneDeploy* - Mapeamento detalhado no coroamento.

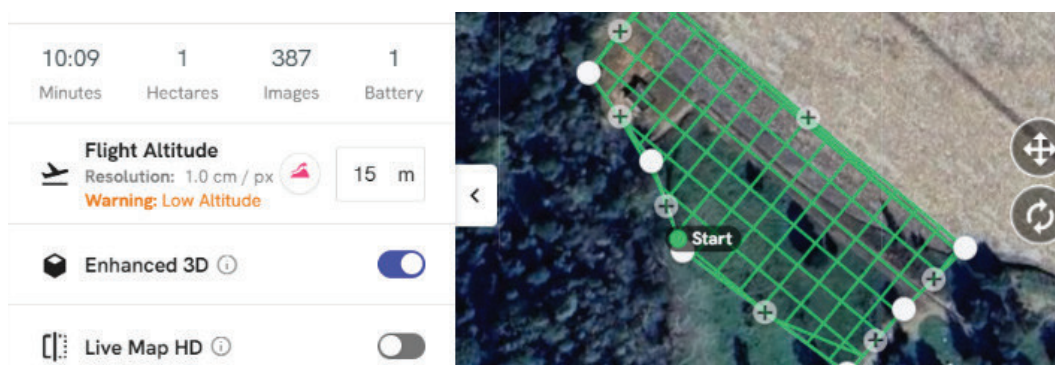


Fig. 7 - *DroneDeploy* - Mapeamento detalhado junto ao pé da barragem.

Outro aspeto fundamental é a sobreposição das imagens. Na fotogrametria convencional, realizada com aeronaves tripuladas, as sobreposições mínimas geralmente aceites são de 60% na direção longitudinal e 30% na lateral. Entretanto, na fotogrametria com drones, as exigências em termos de sobreposição são consideravelmente mais elevadas. Este incremento justifica-se pela maior suscetibilidade dos drones às condições de vento e às variações angulares indesejadas durante o voo.

De forma geral, recomenda-se a utilização de 80 % de sobreposição longitudinal e 50 % de sobreposição lateral para missões fotogramétricas com drones. Em terrenos com grande variação topográfica, como é o caso de regiões montanhosas ou zonas com desníveis acentuados, é aconselhável aumentar ainda mais estes valores, podendo-se adotar configurações de 80/80 ou 70/70 (longitudinal/lateral), com vista a garantir uma cobertura adequada e evitar falhas na reconstrução tridimensional e na geração do mosaico ortorretificado (ver Figura 8).

No caso específico da barragem em análise, em que as zonas dos encontros apresentam variações significativas de altitude, recorreu-se a utilização de 75 % de sobreposição longitudinal e 75 % de sobreposição lateral. Esta configuração visou garantir uma cobertura homogênea mesmo nas regiões de topografia mais acidentadas.

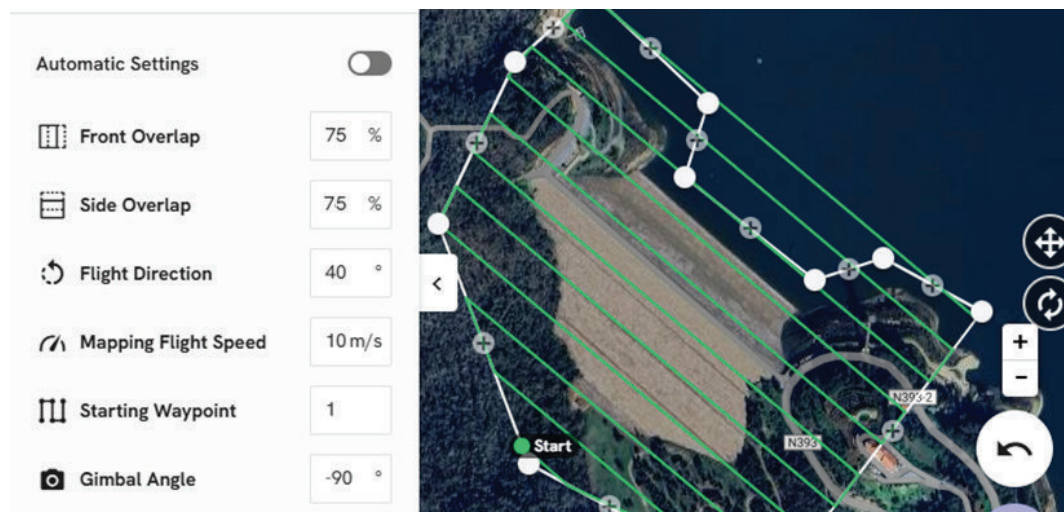


Fig. 8 - DroneDeploy - Configurações avançadas na plataforma.

O parâmetro *Flight Direction* deve ser ajustado de modo a alinhar o percurso do drone com a direção predominante da estrutura da barragem, nomeadamente o seu coroamento. Para este projeto, recorreu-se a orientação do voo segundo um ângulo de 40° relativamente ao Norte (portanto, alinhado com o eixo da barragem), assegurando uma cobertura mais eficiente e reduzindo distorções nas imagens captadas.

A velocidade de voo constitui outro parâmetro importante na definição do plano de missão. Para evitar o fenómeno de *motion blur* (arrastamento da imagem), recomenda-se adotar a velocidade padrão sugerida pela plataforma, que neste caso foi de 10 m/s. Esta velocidade é normalmente adequada para garantir a nitidez das imagens, contudo em condições de baixa luminosidade, poderá ser necessário reduzir a esta velocidade, de modo a não comprometer a eficiência da missão.

A orientação da câmara (*gimbal*) durante o voo deve ser ajustada consoante o objetivo do levantamento. Para voos panorâmicos e ortofotográficos, deve-se manter a inclinação da câmara a -90°, ou seja, com orientação totalmente nadiral. No entanto, para voos de baixa altitude e com objetivo de modelação tridimensional de infraestruturas específicas, como descarregadores de cheias

ou edifícios técnicos, recomenda-se uma ligeira inclinação da câmara, em torno de -75° , de forma a permitir uma melhor captura das fachadas e dos volumes verticais.

3.3 – Pontos de controlo no solo (GCP)

A utilização de GCPs (*Ground Control Point*), ou Pontos de Controlo no Solo, constitui uma prática essencial para maximizar a precisão e a exatidão de levantamentos aéreos realizados com drones, especialmente em projetos que exijam elevada fidelidade espacial, como a monitorização de barragens de aterro.

Antes da execução do voo, recomenda-se a implantação e distribuição criteriosa dos GCPs em locais estratégicos da barragem e das áreas circundantes. Estes pontos consistem em alvos fotointerpretabilidade, ou seja, elementos claramente visíveis e reconhecíveis nas imagens captadas pelo drone. Podem corresponder a elementos naturais do terreno, como esquinas de passeios, interseções de estradas ou marcos geodésicos, ou a alvos artificiais implantados especificamente para este fim, prática comum em áreas rurais ou homogêneas, onde os elementos naturais são escassos ou pouco distintivos.

Um GCP eficaz deve apresentar configuração e coloração que o diferenciem nitidamente do ambiente envolvente e ser preferencialmente construído com materiais de acabamento mate ou fosco para evitar reflexos solares que dificultem a identificação nas imagens. É igualmente fundamental que o alvo possua um ponto central bem definido, facilitando a marcação precisa durante o processamento fotogramétrico. A Figura 9 apresenta alguns modelos de GCP de uso comum, incluindo um modelo tradicional (a) e um modelo baseado em código QR (b), ambos utilizados no âmbito deste trabalho (c) (Freire, 2022).

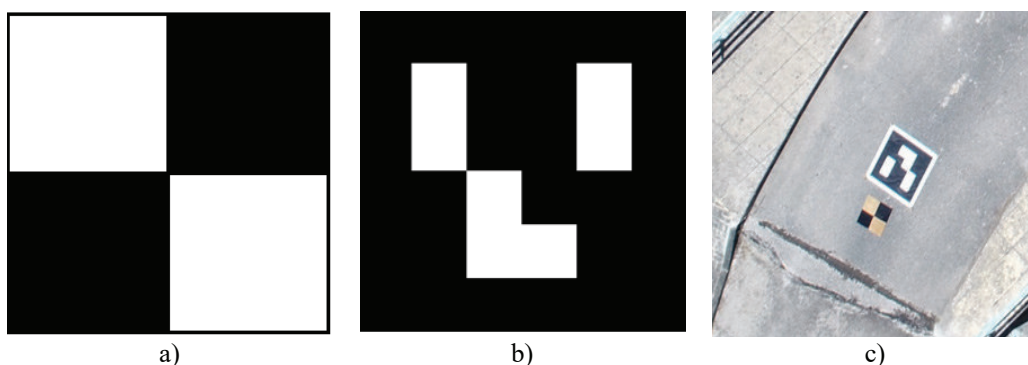


Fig. 9 – Modelos de GCP.

Os GCPs têm duas funções principais: servir como referência de georreferenciamento para corrigir distorções geométricas e alinhar os modelos tridimensionais com o sistema de coordenadas real do terreno, e atuar como pontos de controlo para aferir a precisão do levantamento (Leite et al., 2025; Marcelino et al., 2022 e DronEng, 2023).

O sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System* – Sistema Global de Navegação por Satélite) acoplado no drone fornece posicionamento com precisão métrica. Contudo, o uso de GCPs com coordenadas obtidas por equipamentos de alta precisão, como os recetores GNSS com correções RTK (*Real-Time Kinematic* – Cinemática em Tempo Real) eleva a exatidão do mapeamento à ordem dos centímetros. Alguns drones possuem sistema RTK embarcado, reduzindo a necessidade de GCPs para georreferenciamento, mas não os dispensando para aferição da qualidade dos levantamentos.

Neste sentido, os alvos são usados como Pontos de Verificação (*Check Points*), e seguem a mesma lógica de marcação dos GCPs, mas com finalidade distinta: não participam no ajustamento

fotogramétrico. Funcionam como referência independente para avaliar a precisão posicional do modelo final. A comparação entre as coordenadas reais dos *Check Points* e as estimadas pelo modelo permite aferir a qualidade do georreferenciamento.

Recomenda-se a instalação dos GCPs em pontos estratégicos da estrutura, dando prioridade a áreas com variações altimétricas, bem como nas zonas críticas da barragem, onde se deseja monitorizar com maior precisão. A disposição deve contemplar o coroamento (com, pelo menos, três alvos), as bermas e a zona do pé da barragem, assegurando a cobertura das principais variações altimétricas e reduzindo distorções nos modelos tridimensionais.

A Figura 10 apresenta um exemplo de distribuição e localização de GCPs e pontos críticos da barragem, elaborado na aplicação *Google My Maps* para mapeamento da barragem da Lapa. Esta aplicação pode ser utilizada *in loco*, permitindo a navegação até aos pontos georreferenciados através do GPS do dispositivo móvel.

A instalação deve ser planeada de forma antecipada, privilegiando alvos artificiais contrastantes e bem definidos, distribuídos uniformemente por toda a área de interesse. As coordenadas devem ser obtidas com equipamentos de elevada precisão, como recetores GNSS com correção diferencial (RTK ou PPK) ou estações totais, conforme as exigências do projeto (Mappa, 2022).

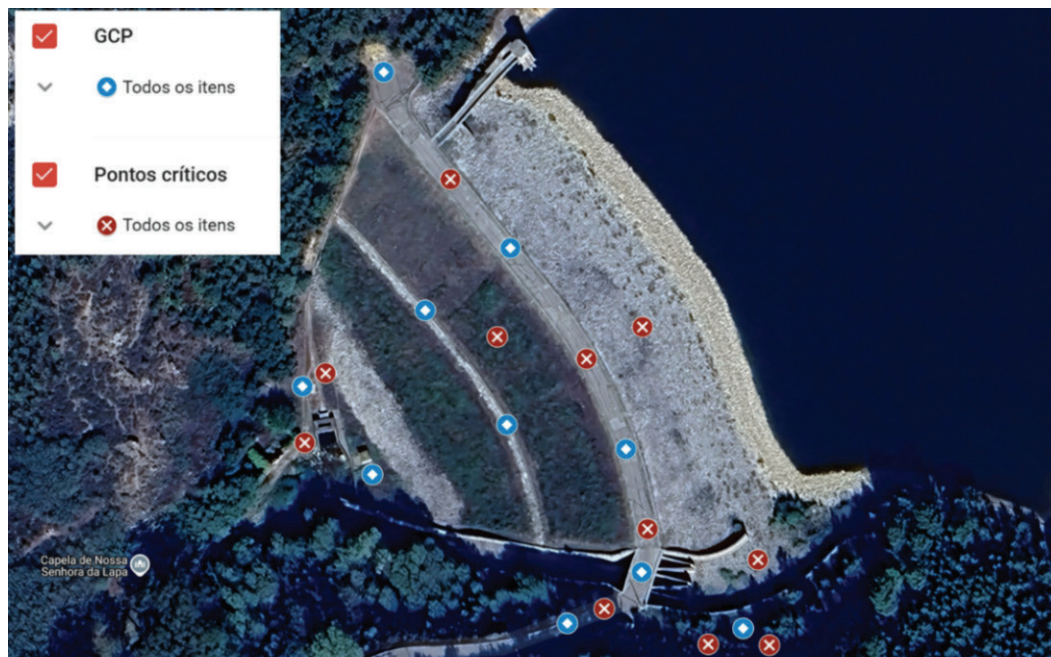


Fig. 10 – Mapa de localização dos GCPs e Pontos críticos da barragem (*Google My Maps*).

Sempre que sejam identificadas anomalias visuais ou funcionais, tais como fissuras, subsidência localizada, zonas húmidas ou vegetação atípica, recomenda-se a colocação de GCPs adicionais nas proximidades. Esta estratégia permite comparar, com elevada precisão, diferentes modelos gerados ao longo do tempo, possibilitando a deteção de variações sub-centimétricas e o acompanhamento sistemático da evolução das anomalias.

4 – SOFTWARES DE CÓDIGO ABERTO PARA O PÓS PROCESSAMENTO

Após a aquisição de imagens através de drones, o processamento fotogramétrico transforma esses dados em produtos cartográficos úteis para análise. Este processo gera ortofotos (imagens

corrigidas geometricamente), Modelos Digitais de Superfície (MDS) e Modelos Digitais do Terreno (MDT), que são fundamentais para identificar deformações e anomalias em estruturas como barragens de aterro (Leite et al., 2020).

4.1 – WebODM

No âmbito deste trabalho, para o processamento das imagens e obtenção das ortofotos e modelos de terreno optou-se pela utilização do *WebODM*, uma solução de código aberto que oferece resultados de qualidade equivalente aos softwares comerciais mais utilizados no mercado, como o *Agisoft Metashape* e o *Pix4D*, mas sem os elevados custos de licenciamento, que podem atingir milhares de euros (disponível em: <https://www.opendronemap.org/webodm/>).

O *WebODM* destaca-se por várias razões práticas:

- Sem custo de utilização: Sendo uma ferramenta de código aberto, elimina completamente os custos de licenciamento, tornando-se acessível a qualquer organização ou investigador, quando instalado num computador pessoal ou num servidor disponível.
- Processamento ilimitado: Ao contrário das soluções comerciais que limitam o número de imagens processadas mensalmente, o *WebODM* apenas depende da capacidade do hardware utilizado.
- Flexibilidade total: Permite personalizar todos os parâmetros de processamento e adaptar o software às necessidades específicas de cada projeto.
- Qualidade profissional: Gera os mesmos tipos de produtos que as soluções comerciais, incluindo:
 - Ortofotos de alta resolução
 - Nuvens de pontos densas para modelação 3D detalhada
 - Modelos digitais de elevação precisos
 - Modelos 3D texturizados para visualização

O programa possui uma interface intuitiva e de fácil utilização. É acessível através de um navegador de internet, permitindo o acesso ao servidor a partir de qualquer local e em qualquer tipo de dispositivo que disponha de navegador web (ver Figura 11).

Ao criar um novo projeto, é possível carregar as imagens juntamente com o ficheiro de Pontos de Controlo no Solo (GCPs), que contém as informações dos pontos de controlo obtidas em campo, nomeadamente as suas coordenadas georreferenciadas.



Fig. 11 – Interface do software *WebODM - OpenDroneMap™* (2025).

4.2 – Otimização do georreferenciamento com o GCP Finder

O *GCP Finder* (disponível em: https://github.com/octaviojardim/GCP_Finder) é uma ferramenta desenvolvida em parceria entre o NOVALINCS - *NOVA School of Science and Technology* (FCT NOVA) e o LNEC, destinada à deteção automática de marcadores *ArUco* em imagens aéreas captadas por drones. A aplicação identifica automaticamente a localização destes marcadores em coordenadas de pixéis e gera um ficheiro *gcp_list.txt* compatível com o *WebODM*, facilitando significativamente o processo de georreferenciamento (Freire, 2022 e Marcelino et al., 2022).

Os marcadores *ArUco* (ver Figura 12) devem ser impressos em alta resolução e produzidos como adesivos de 1×1 metro, colados em tábuas de madeira para fixação no terreno. O georreferenciamento destes alvos requer instrumentos de posicionamento de alta precisão (RTK ou GNSS geodésico).

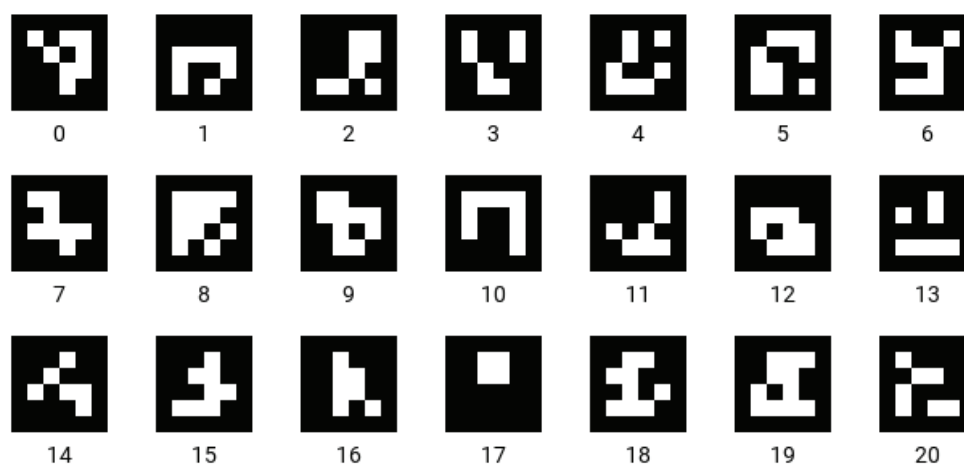


Fig. 12 – Modelos de marcadores *ArUco*.

4.3 – CloudCompare

O programa *CloudCompare* destaca-se como uma ferramenta essencial no contexto da comparação de nuvens de pontos, para identificar alterações nas superfícies entre diferentes levantamentos. Desenvolvido como um projeto de código aberto, o *CloudCompare* destina-se a visualizar, editar e processar dados 3D, com especial incidência na análise de nuvens de pontos e malhas. A sua última versão, 2.13.0 Kharkiv, lançada a 14 de fevereiro de 2024, é regida pela GNU General Public License (GPL), que permite a sua utilização para vários fins, incluindo aplicações comerciais e educativas (CloudCompare, 2025).

O *CloudCompare* suporta várias funcionalidades, como deteção de mudanças, e é capaz de comparar duas nuvens de pontos diferentes, podendo ser útil na deteção de assentamentos, *heaving* e outras deformações relacionadas ao movimento de massas em barragens e zonas adjacentes.

5 – MODOS DE FALHA MAPEÁVEIS POR LEVANTAMENTO AÉREO COM DRONES

De modo geral, as anomalias manifestam-se na superfície da barragem, nos encontros e nas áreas adjacentes, estando frequentemente associadas a modos de falha específicos. A compreensão destes modos de falha e das suas possíveis manifestações, como anomalias à superfície, auxilia não só na avaliação das condições de segurança da barragem, como também orienta a elaboração de um

plano de voo eficiente, que concentra esforços nas áreas de maior probabilidade de manifestação das patologias associadas.

Apresenta-se a seguir, alguns dos principais modos de falha que podem ser mapeáveis com drones, através da detecção de anomalias como fissuras, escorregamentos, ressurgências, assentamentos, erguimentos, deformações, cavidades (*sinkholes*), levantamentos hidráulicos (*heave*), água turva, zonas húmidas, entre outras, que se manifestam de alguma forma na superfície da barragem, fundações e/ou encontros.

Verifica-se na Figura 13, que o *piping* pode ser identificado através de ressurgências com água turva, escorregamentos e fissuras em arco, bem como pela presença de *sinkholes* (Guidicini et al., 2021; USBR, 2019 e Government of British Columbia, 2025).

Já a Figura 14, mostra que nas fundações o *piping* pode manifestar-se através de ressurgências a jusante, com a presença de água turva ou arrastamento de finos da fundação, *sand boil* e fissuras no aterro (Hanneman, D., 2023).

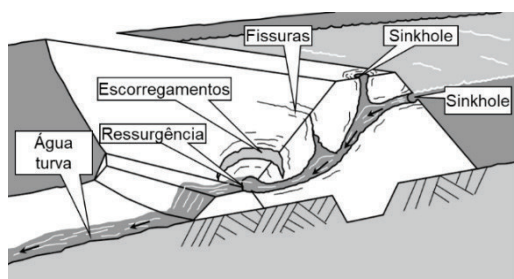


Fig. 13 – Erosão interna (*piping*) em aterros.

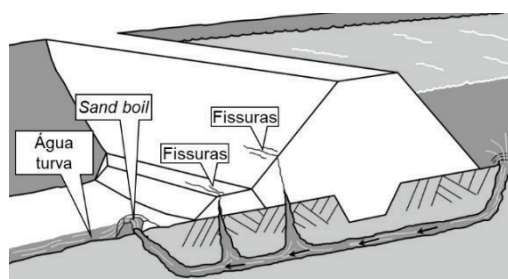


Fig. 14 – Erosão interna em fundações.

Conforme se verifica na Figura 15, as fraturas pré-existentes nas fundações podem facilitar a ocorrência de *piping*, que se manifesta inicialmente por fissuras no paramento, ressurgências com água turva e/ou com finos da fundação (Mejia, 2013).

A Figura 16, mostra que o *piping* pode ocorrer na interface entre o solo e a estrutura, inicialmente manifestando-se através de fissuras, ressurgências de água turva ou presença de finos na fundação (Silveira, 2019 e Medeiros, 2015).

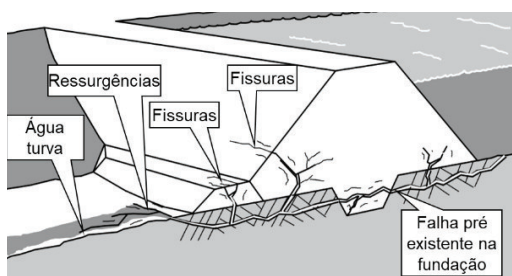


Fig. 15 – *Piping* em fraturas.

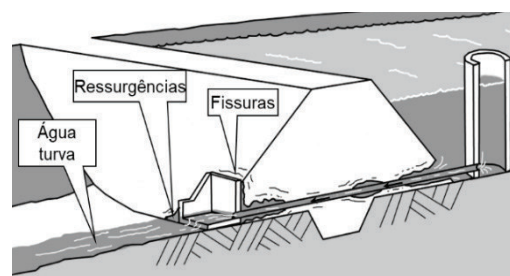


Fig. 16 – *Piping* entre solo e estrutura.

Já a Figura 17, mostra que os solos dispersivos, suscetíveis à formação de *piping*, podem manifestar-se por fissuras em forma de mapa, erosões, bem como ressurgências, escorregamentos, *sinkholes* e presença de água turva (USDA, 2006; Tosun e Kılıbıyık, 2006; Hardie et al., 2009; Cruz, 2008).

O processo de sufusão pode ocorrer em solos mal graduados, cuja granulometria facilita a migração de finos. A Figura 18, apresenta um modelo cujas anomalias se manifestam pela formação de numerosos *sinkholes* e pela presença de finos a jusante (Richards et al., 2015 e USACE, 2022).

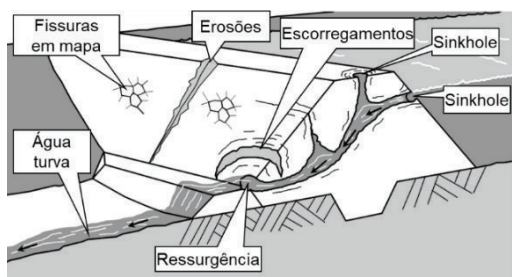


Fig. 17 – *Piping* em solos dispersivos.

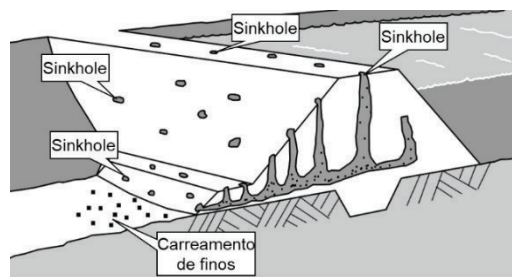


Fig. 18 – *Piping* por sufusão.

A Figura 19, apresenta um tipo de anomalia, cujo o processo de aerofotogrametria, permite a geração e comparação de nuvens de pontos, facilitando a identificação de anomalias relacionadas a deformações, tais como o levantamento hidráulico (*heaving*) por excesso de subpressão (Robbins et al., 2015 e Bandeira et al., 2018).

No que se refere ao excesso de pressão intersticial, a Figura 20, apresenta um modelo cujas cargas aplicadas aos solos aumentam rapidamente, sem permitir que as pressões na água dos poros se dissipem, ocasionando a perda de resistência ao corte, favorecendo a ocorrência de fissuração longitudinal e assentamentos (Souza, 2017 e Mello, 1982).

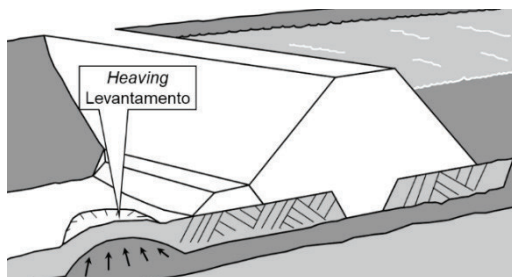


Fig. 19 – Levantamento (*heaving*).

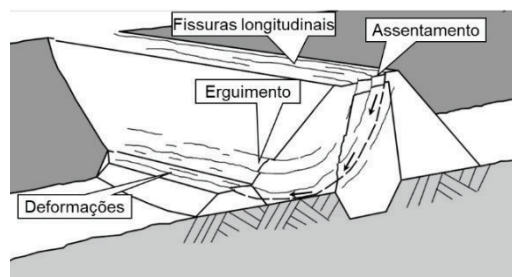


Fig. 20 – Excesso de pressão intersticial.

Conforme se verifica na Figura 21, o rebaixamento rápido da albufera pode causar instabilidade nos taludes de montante, aumentando o risco de escorregamentos, assentamentos e fissuras em arco (Narita, 2000 e FEREC, 1978).

A Figura 22, mostra que problemas no sistema de drenagem interna, podem provocar a subida do nível de água no aterro, favorecendo a ocorrência de zonas húmidas, assentamentos, fissuras nos arcos, deformações e escorregamentos (Mello, 1997).

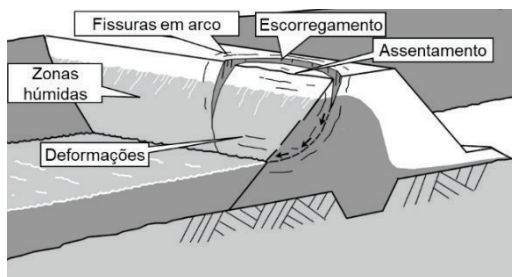


Fig. 21 – Rebaixamento rápido da albufera.

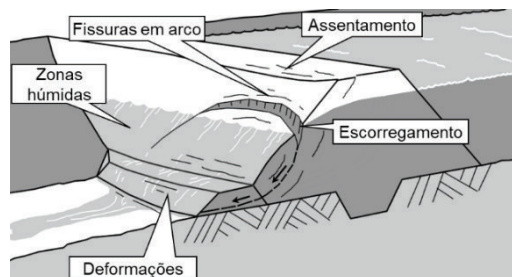


Fig. 22 – Sistema de drenagem deficiente.

Conforme ilustrado na Figura 23, a presença de solos moles na fundação, pode favorecer a ocorrência de instabilização, provocando assentamento, elevação a jusante e fissuras em arco (Vu et al., 2023).

Conforme apresentado na Figura 24, barragens de aterro, podem apresentar assentamentos excessivos por molhagem, especialmente durante o primeiro enchimento, resultando em fissuras longitudinais, deslizamento e deformação excessiva (Marcelino, 1996).

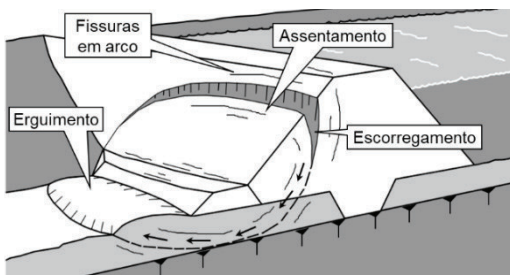


Fig. 23 – Instabilidade por corte na fundação.

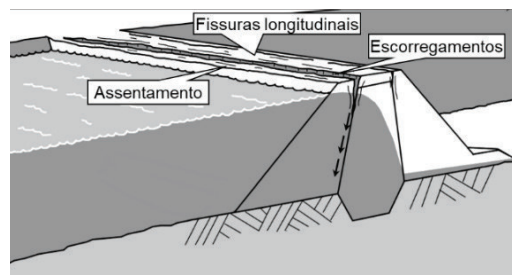


Fig. 24 – Perda da folga por assentamentos.

Já os assentamentos diferenciais na fundação e no aterro, podem provocar fissuras transversais, resultando numa perda de folga e favorecendo a abertura de uma brecha na barragem, conforme apresentado na Figura 25 (He et al., 2021; Fell, 2014).

Conforme apresentado na Figura 26, os assentamentos diferenciais também podem favorecer a ocorrência de fracturação hidráulica e o surgimento de fissuras longitudinais sub-horizontais no talude de jusante (Sherard, 1986).

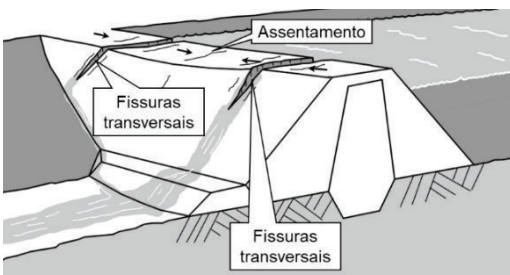


Fig. 25 – Perda da folga por fissuras.

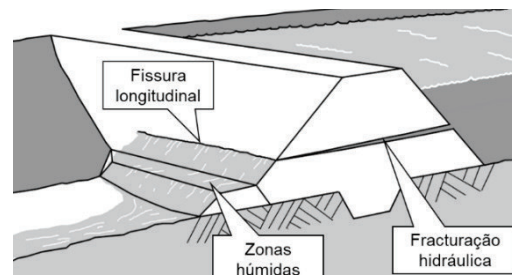


Fig. 26 – Fracturação hidráulica.

6 – CASO DE ESTUDO

Para ilustrar a aplicação dos drones na inspeção de barragens, apresenta-se o caso de estudo da barragem da Lapa. Trata-se de uma barragem de aterro com altura máxima de 24 m e com coroamento à cota 174,0 m, estando representado o seu perfil transversal na Figura 27. O nível de pleno armazenamento (NPA) é igual a 170,0 m. O nível de máxima cheia (NMC) é igual a 171,92 m e o nível mínimo de exploração (NmE) é de 162,2 m. A albufeira criada no NMC tem um volume relativamente pequeno (0,64 hm³), com uma área inundada de 9,5 ha. Os taludes de montante e de jusante apresentam, respetivamente, inclinação de 1:3,25 (V:H) e de 1:2,5 (V:H). O paramento de jusante dispõe de uma banquetta, com uma largura de 2,5 m, situada à cota 164,0 m.

Desde a sua construção, em 1999, a Barragem da Lapa apresenta comportamentos fora dos parâmetros de segurança e funcionalidade esperados. Foram registados assentamentos acumulados no coroamento de até 56 cm (desde 2002) e deslocamentos horizontais de cerca de 19 cm,

evidenciando a deformação contínua do aterro. Desde então a barragem apresentou grande quantidade de fissuração, predominante no coroamento. De acordo com o LNEC (2024), a percolação ao longo da fundação constitui outra patologia relevante, com gradientes hidráulicos significativos em alguns perfis. A avaliação destas condições atualmente é dificultada pela inoperacionalidade de 11 dos 19 piezómetros, comprometendo o controlo das pressões intersticiais.

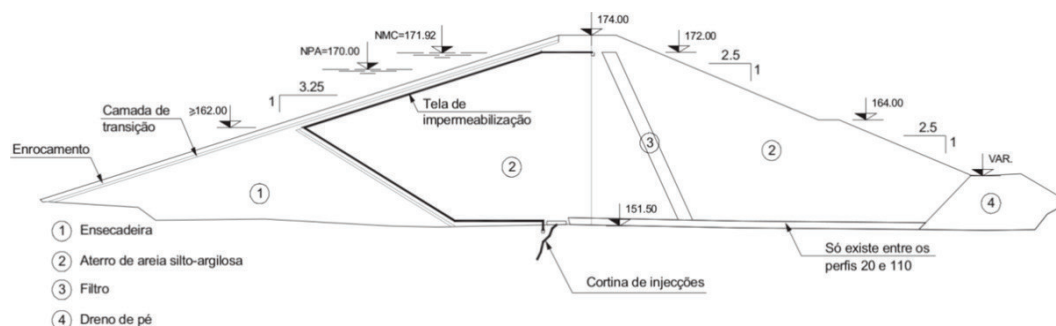


Fig. 27 – Secção transversal tipo da barragem da Lapa.

No âmbito do acompanhamento do LNEC a esta barragem, realizaram-se três campanhas de inspeção com recurso a drones, nos dias 20 de julho de 2021, 19 de maio de 2022 e 4 de junho de 2025. O plano de voo foi estruturado de forma a priorizar a resolução espacial (GSD) nas zonas críticas da barragem, identificadas previamente nos relatórios de inspeção de segurança de barragens, elaborados pelo LNEC (2024), tendo em consideração os dispositivos de observação e inspeções. Deste modo, foram previamente identificadas as seguintes anomalias:

- Movimentos horizontais excessivos na encosta junto ao descarregador de cheias, na margem esquerda, sugerindo instabilidade localizada;
- Infiltrações persistentes no sistema de drenagem interna, com caudal elevado no poço de bombagem, indicando problemas de estanquidade;
- Fenómenos de descompressão de materiais no paramento de montante, próximo à torre de tomada de água;
- Focos localizados de vegetação arbustiva no aterro, potencialmente associados a processos de fissuração e perda de integridade estrutural.

Deste modo, o foco principal das inspeções aéreas teve como referência o Mapa de Zonas Críticas da barragem, previamente identificadas (ver Figura 10).

As campanhas de levantamento aéreo foram conduzidas com um drone DJI Phantom 4 Pro, operando com o apoio de 10 pontos de controlo no solo (GCPs), georreferenciados por meio de GPS geodésico. Esta abordagem assegurou elevada precisão na aquisição das imagens e na geração de ortofotomapas e modelos digitais de superfície, fundamentais para a avaliação pormenorizada do comportamento superficial da estrutura.

6.1 – Planeamento de voo

O planeamento das missões de voo foi realizado recorrendo ao software *DroneDeploy*, assegurando simultaneamente a cobertura integral da área de interesse e a aquisição de dados com elevada resolução espacial. Os planos de voo foram concebidos com base nos seguintes critérios fundamentais: cobertura completa da estrutura da barragem, incluindo o corpo principal, os encontros, os paramentos de montante e jusante, bem como as áreas adjacentes; mapeamento detalhado das zonas críticas da barragem; sobreposição adequada das imagens, estabelecida em 75% (longitudinal) e 75% (lateral), garantindo a geração de ortofotomapas e modelos digitais de

superfície de elevada qualidade; e resolução espacial sub-centimétrica, fundamental para a deteção de anomalias superficiais, nomeadamente fissuras, zonas de humidade, manchas, escorregamentos ou vegetação atípica.

Para cada campanha, novos planos de voos foram adicionados com alturas mais baixas, adaptados às características da barragem e tendo como foco as zonas críticas identificadas durante as etapas anteriores, conforme descrito a seguir:

- **Primeira Campanha (20 de julho de 2021):** foram executados dois planos de voo distintos. O Voo Geral foi realizado a 150 metros de altitude, com resolução espacial de 4,2 cm/pixel, abrangendo aproximadamente 10 hectares e capturando 48 imagens da área envolvente da barragem. O Voo Detalhado foi efetuado a 60 metros de altitude, alcançando uma resolução de 1,7 cm/pixel, com enfoque no corpo principal da barragem.
- **Segunda Campanha (19 de maio de 2022):** compreendeu a replicação dos voos anteriores e a introdução sobre o Voo sobre o Coroamento, executado a 30 metros de altitude (1,0 cm/pixel), especificamente concebido para a deteção de fissuras finas e assentamentos no coroamento.
- **Terceira Campanha (4 de junho de 2025):** incorporou todos os voos das campanhas anteriores e três novos planos de voo especializados. O Voo sobre o Coroamento foi executado a 15 metros de altitude (0,4 cm/pixel), o Voo sobre a zona de Jusante foi realizado a 30 metros de altitude (0,8 cm/pixel) e o Voo sobre o Descarregador de cheias foi efetuado a 35 metros de altitude (1,0 cm/pixel).

Este acréscimo no número de voos e a redução da altura de voo fizeram parte do processo de aprendizagem no âmbito do desenvolvimento da metodologia, tendo como objetivo principal a maximização da resolução espacial (GSD) e a cobertura detalhada das áreas críticas da infraestrutura.

6.2 – Pós-processamento

O processamento foi realizado com a ferramenta *WebODM*, adotando parâmetros otimizados para garantir a máxima qualidade dos produtos fotogramétricos gerados, mantendo um equilíbrio entre resolução espacial, tempo de processamento e volume de dados. Entre as configurações utilizadas destacam-se: delimitação automática da área de processamento; utilização de um polígono personalizado no formato *GeoJSON* para restringir a análise às zonas de interesse; definição de resolução de 2,0 metros para os Modelos Digitais de Superfície (MDS) e de terreno (MDT), geração simultânea de MDS e MDT; ortofotomapas com resolução de 1,0 cm/pixel; classificação automática da nuvem de pontos para distinguir solo, vegetação e estruturas, e reconstrução de alta qualidade para aumentar a densidade e precisão da nuvem de pontos.

Em termos de resultados quantitativos, a campanha de 20 de julho de 2021 processou 295 fotografias, resultando num ortofotomapa com resolução média de 1,6 cm/pixel e cobrindo aproximadamente 5,37 hectares. A nuvem de pontos densa gerada continha 172 248 166 pontos (ver Figura 28).

Na campanha de 19 de maio de 2022, foram utilizadas 357 fotografias, obtendo-se um ortofotomapa de 1,5 cm/pixel sobre uma área de 5,02 hectares, com uma nuvem de pontos composta por 263 438 091 pontos (ver Figura 29).

6.3 – Análise das deformações e assentamentos

Conforme referido acima, a Barragem da Lapa tem apresentado assentamentos excessivos ao longo do tempo com especial incidência ao longo do coroamento. Estes movimentos anómalos resultaram nas seguintes consequências estruturais:



Fig. 28 – Barragem da Lapa - Modelo texturizado (20/07/2021).



Fig. 29 – Barragem da Lapa - Modelo texturizado (19/05/2022).

Já a campanha de 4 de junho de 2025 foi a mais extensa, com 977 fotografias processadas. O ortofotomapa apresentou resolução média de 2,0 cm/pixel, abrangendo cerca de 5,06 hectares, e a nuvem de pontos densa atingiu 289 336 742 pontos (ver Figura 30).



Fig. 30 – Barragem da Lapa - Modelo texturizado (04/06/2025).

6.3.1 – Anomalias nos Maciços, Coroamento e Encontros

As principais manifestações patológicas identificadas anteriormente, incluíram a fissuração generalizada do coroamento, particularmente nas áreas adjacentes ao apoio do passadiço de acesso à torre de tomada de água. Observou-se também fissuras (da ordem de 1 cm) e assentamentos diferenciais (de cerca de 3 cm) entre o passadiço sobre o descarregador de cheias e o aterro confinante, além de deslocamentos significativos entre a estrutura de suporte da caleira e o muro do canal do descarregador de cheias, acompanhados de assentamentos desta estrutura em relação ao muro.

Identificou-se, ainda, uma eventual instabilidade do talude de montante decorrente dos movimentos mais intensos, enquanto os dispositivos de observação indicaram movimentação do encontro direito da estrutura.

Conforme se verifica nas figuras a seguir, de um modo geral, o aspeto das fissuras relacionadas com os assentamentos da barragem não evoluíram significativamente, entre os levantamentos efetuados em 2021 e 2025. No entanto, no encontro esquerdo, aparentemente a caleira no topo do talude de escavação do descarregador apresenta uma degradação que poderá estar associada à movimentação do talude. Este fenómeno foi igualmente observado nas leituras das marcas topográficas instaladas nesta zona.

As Figuras 31 a 33 apresentam uma comparação das fissuras junto aos passadiços de acesso a torre e sobre o descarregador, nos quais não se verificam grandes evoluções, indicando que o fenómeno de assentamento nestas zonas se encontra em processo de estabilização.

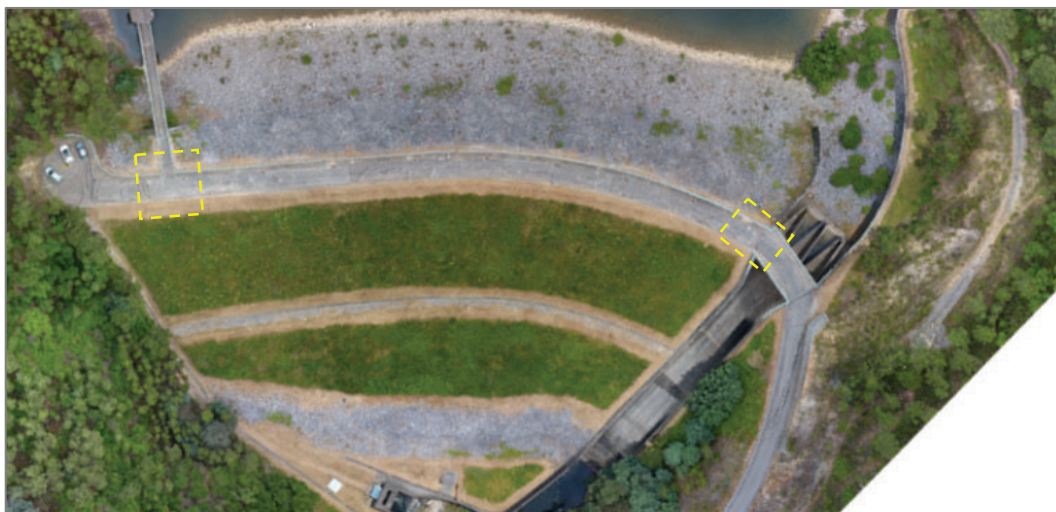


Fig. 31 – Localização da zona onde ocorrem fissuras no coroamento, junto ao passadiço de acesso a tomada de água e junto ao passadiço do descarregador.

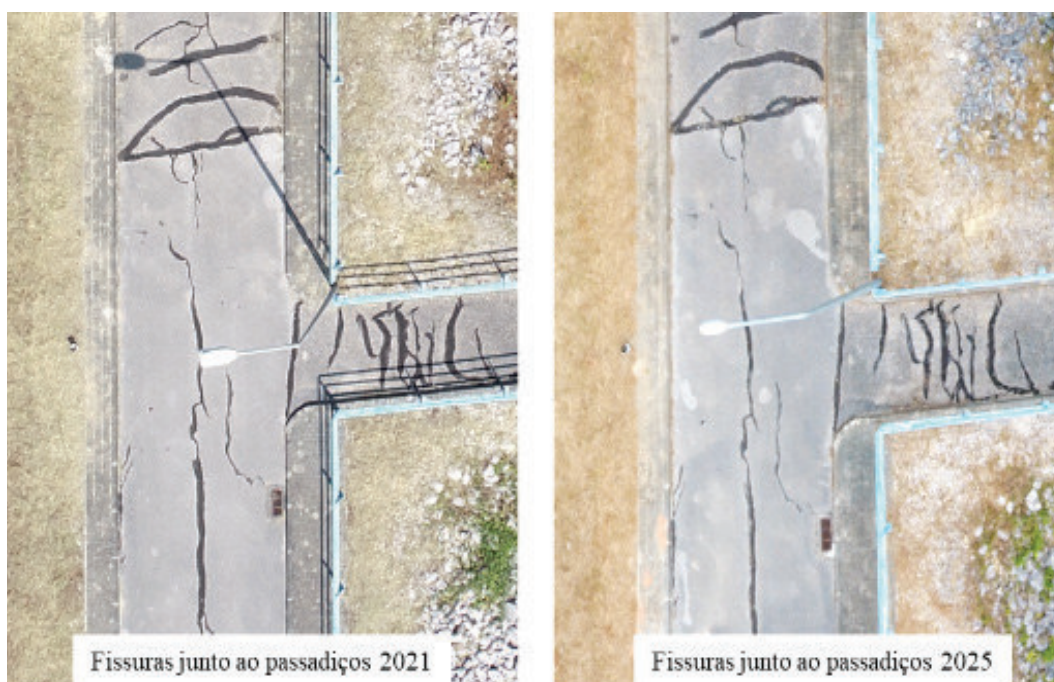


Fig. 32 – Fendas no coroamento, junto ao passadiço de acesso a tomada de água. Comparação entre as campanhas de 2021 e 2025.



Fig. 33 – Fissuras no coroamento, junto ao passadiço do descarregador.
Comparação entre as campanhas de 2021 e 2025.

Verificou-se também que a caleira junto ao descarregador, no talude jusante encontra-se estável, sem maiores indícios de movimentos (ver Figuras 34 e 35).



Fig. 34 – Localização da zona onde ocorrem fissuras junto ao descarregador, no talude de jusante.

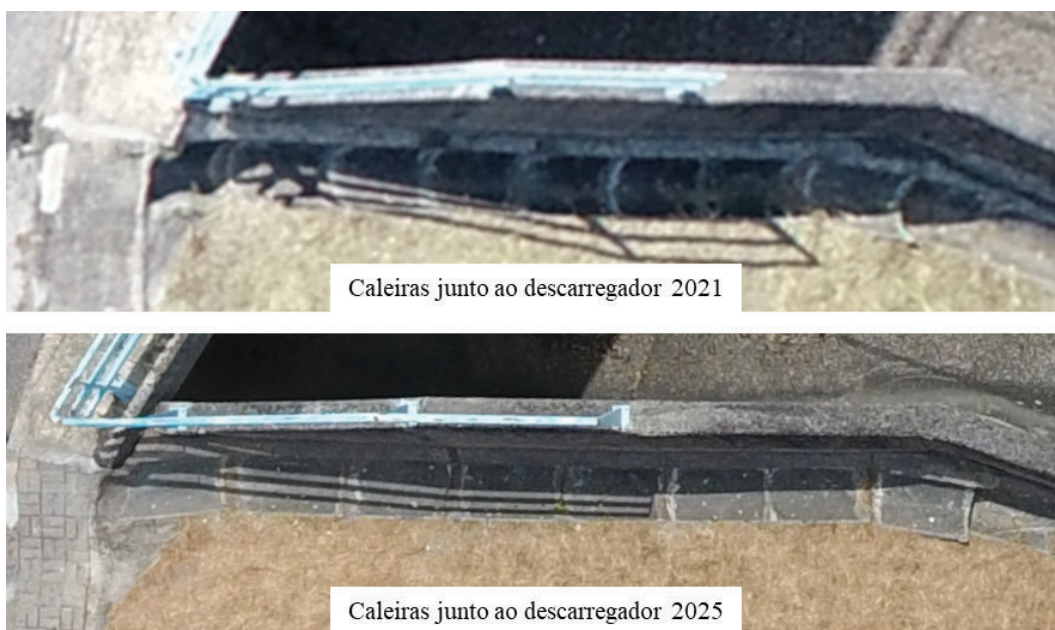


Fig. 35 – Fissuras junto ao descarregador, no talude de jusante.
Comparação entre as campanhas de 2021 e 2025.

No entanto, verifica-se que a caleira localizada no talude de escavação do descarregador, junto ao encontro esquerdo, apresentou sinais de evolução das fendas, entre as campanhas em análise, com aumento na abertura, passando de dimensões da ordem de 4 cm, para cerca de 10 cm (ver Figuras 36 e 37).



Fig. 36 – Localização da zona onde ocorrem fissuras na caleira do talude de escavação junto ao descarregador.

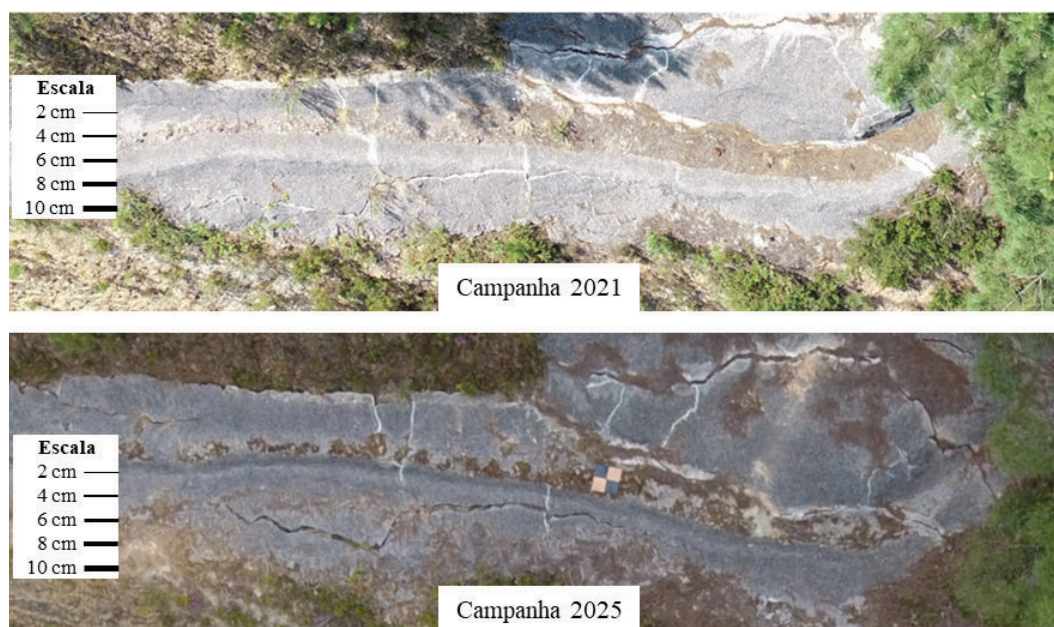


Fig. 37 – Fissuras na caleira do talude de escavação junto ao descarregador.
Comparação entre as campanhas de 2021 e 2025.

No que se refere à comparação entre os modelos tridimensionais, a Figura 38 apresenta as ortofotos da campanhas de 2021 e 2025, onde é possível observar que, num período de aproximadamente quatro anos, a barragem apresenta algumas alterações morfológicas, nomeadamente, algumas alterações na vegetação no talude de jusante e nas zonas adjacentes à barragem e albufeira. Estas alterações devem ser tidas em consideração ao interpretar os modelos tridimensionais.



Fig. 38 – Comparação entre as ortofotos das campanhas de 2021 e 2025.

Deste modo, efetuou-se a comparação das diferenças entre as nuvens de pontos das campanhas de 2021 e 2025, recorrendo-se ao programa *CloudCompare*. Conforme se verifica na Figura 39, os resultados desta análise mostram que as zonas com coloração azul correspondem a áreas sem variação significativa entre as campanhas, enquanto as zonas a vermelho indicam alterações

superiores a 0,5 metros. De um modo geral, as zonas a vermelho representam áreas onde a vegetação se desenvolveu acima de 50 cm, sendo esta diferença evidente no primeiro plano do talude adjacente ao coroamento.

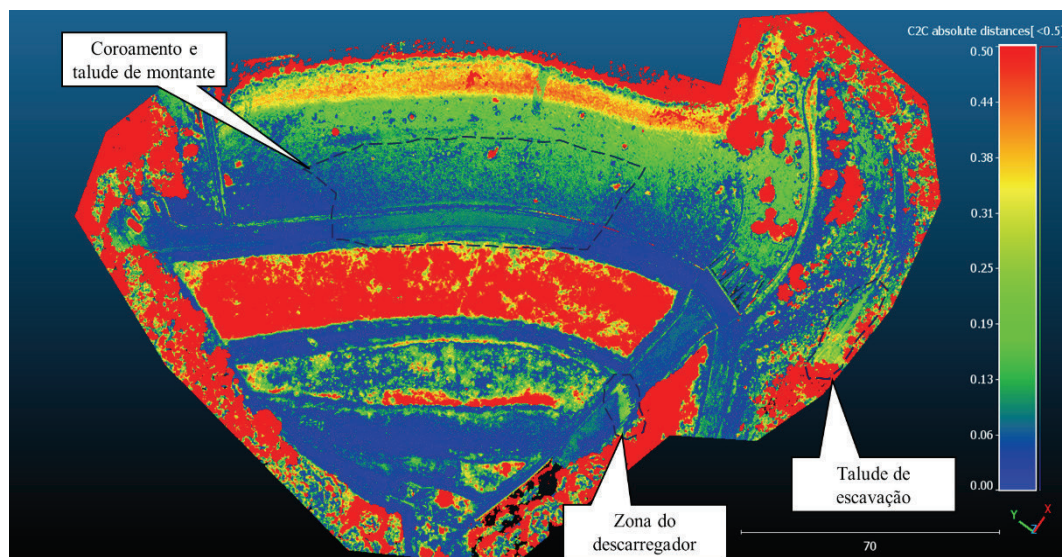


Fig. 39 – Comparação entre nuvens de pontos das campanhas de 2021 e 2025 (CloudCompare).

No entanto, é possível observar assentamentos relevantes na zona central do coroamento. É possível também inferir que a zona a montante da barragem apresenta uma tendência de assentamento. Já a zona do talude de escavação do descarregador, na área de maior altura, também apresenta deformações importantes. Chama-se a atenção para a zona central do canal do descarregador, que parece ter sofrido um assentamento na laje. No entanto, esta anomalia deve ser verificada em campo, visto que na proximidade de árvores a triangulação dos pontos nesta zona pode estar comprometida.

6.3.2 – Verificação dos indícios de percolação descontrolada

Segundo LNEC (2024), a barragem da Lapa apresenta registos de afluência excessiva junto ao poço de bombagem, da ordem de 72 litros/minuto, bem como o registo de afluências de água nos drenos do muro ala direito e através das juntas dos painéis da laje do descarregador de cheias, especialmente quando o nível de água da albufeira (NAA) excedeu os 165,0 m. A barragem apresenta a zona imediatamente a jusante, no talvegue, totalmente submersa.

No entanto, tendo por base a inspeção detalhada com drone, conforme se verifica na Figura 40a, não se verificaram indícios de humidade junto ao pé do aterro, tendo sido feita a visita num período relativamente seco. Também não foi possível confirmar a ocorrência de infiltrações ao longo do canal do descarregador, exceto na base do mesmo, onde se encontra submerso (ver Figura 40b).

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho demonstrou a aplicabilidade dos drones como ferramentas complementares na monitorização e inspeção de barragens de aterro. A metodologia demonstrou que os drones, quando adequadamente especificados e operados, constituem uma solução técnica e economicamente viável

para superar limitações dos métodos convencionais de monitorização ou para os complementar com grande valor acrescentado.

A integração de drones com o *WebODM + GCP Finder* proporcionou resultados equivalentes às soluções comerciais de elevado custo, demonstrando capacidades fundamentais para a segurança de barragens. A obtenção de resolução espacial sub-centimétrica ($GSD < 1 \text{ cm/pixel}$) permitiu a deteção de anomalias de forma abrangente, eliminando os "pontos cegos" típicos da instrumentação pontual tradicional e assegurando cobertura integral da estrutura.



a) Zona imediatamente a jusante

b) Canal do descarregador

Fig. 40 – Verificação de indícios de percolação descontrolada.

7.1 – Considerações sobre as anomalias observadas na barragem da Lapa

A comparação entre nuvens de pontos obtidas por levantamento com drone em 2021 e 2025 revelou alterações morfológicas significativas na estrutura da barragem. O processamento dos dados no software *CloudCompare* permitiu identificar as zonas com alterações mais significativas:

- **Zona Central do Coroamento:** assentamentos de 15–20 mm entre 2021 e 2025.
- **Zona a Montante:** tendência de assentamento de 10–15 mm.
- **Talude de Escavação do Descarregador:** deformações significativas na zona de maior altura, sugerindo instabilidade local ou alteração nas condições de drenagem.
- **Canal do Descarregador:** indícios de assentamento da laje central, carecendo de confirmação em campo devido a limitações de triangulação.

No que se refere aos indícios de infiltração, os resultados da inspeção aérea não revelaram ocorrer indícios visíveis de humidade na zona do pé do aterro. No entanto, é importante salientar que esta ausência de manifestações pode estar diretamente relacionada com as condições temporais específicas durante o período da inspeção, nomeadamente um nível baixo da albufeira, não excluindo a possibilidade de ocorrência de infiltrações em condições hidrológicas distintas.

A zona imediatamente a jusante da barragem apresenta-se totalmente submersa, limitando significativamente a capacidade de inspeção visual direta de potenciais manifestações de percolação nesta área crítica.

Tendo em consideração as anomalias acima registadas analisaram-se os diversos modos de falha de forma sistemática de modo a enquadrar as anomalias num possível modo de falha, que possa estar em desenvolvimento na estrutura. Assim, o modo de falha mais provável é a "Perda da folga por assentamentos". Este é um modo de falha crítico em barragens de aterro. O principal mecanismo envolve o assentamento excessivo do corpo da barragem ou da sua fundação devido ao rearranjo das partículas por molhagem no caso de enrocamentos e à compressão de materiais pouco consolidados no caso dos solos. A saturação progressiva da zona de montante durante o primeiro enchimento provoca deformações no maciço, criando zonas de tração no topo da estrutura que resultam na abertura de fissuras no coroamento (ver Figura 25).

7.2 – Vantagens e limitações da metodologia

A metodologia apresenta em primeira análise, vantagens económicas pela eliminação de custos de licenciamento de software e processamento ilimitado de imagens, dependendo apenas da capacidade do hardware disponível. A flexibilidade total para personalização de parâmetros e adaptação às necessidades específicas de cada projeto constitui outro benefício relevante.

Contudo, foram identificadas algumas limitações que devem ser consideradas na implementação. As condições meteorológicas adversas, a interferência da vegetação densa e a complexidade operacional de voos de baixa altitude exigem competências especializadas e planeamento cuidadoso. A dependência de GCPs implica trabalho de campo adicional e requisitos computacionais elevados para processamento de grandes volumes de dados.

7.3 – Contribuições para a segurança de barragens

Este trabalho estabelece um protocolo estruturado para inspeção de barragens com drones, desde o planeamento até à análise de resultados, contribuindo para o avanço do estado da arte na segurança destas infraestruturas. A relação estabelecida entre anomalias detetáveis por drone e modos de falha específicos oferece bases sólidas para a deteção precoce de problemas incipientes.

A capacidade de análise temporal através da comparação de modelos tridimensionais permite o acompanhamento sistemático da evolução de anomalias, potenciando a gestão proactiva do risco e a manutenção preventiva. Esta abordagem complementa eficazmente os dispositivos de observação tradicionais, proporcionando uma visão abrangente do comportamento estrutural.

7.4 – Recomendações e perspetivas futuras

Para implementação prática, recomendam-se drones com autonomia mínima de 30 minutos, alcance superior a 5 km, resistência ao vento até 12 m/s e sistemas RTK para levantamentos de alta precisão. O planeamento deve combinar voos gerais (GSD 2-4 cm/pixel) com voos detalhados (GSD 0,2-1 cm/pixel) nas zonas críticas, utilizando sobreposições mínimas de 75% em terrenos acidentados.

No que se refere às perspetivas futuras, encontra-se em desenvolvimento a otimização de Redes Neurais Convolucionais para a deteção automatizada de possíveis anomalias identificadas nas imagens obtidas por drones. Vislumbra-se ainda o desenvolvimento de uma metodologia integrada, envolvendo imagens de satélite, dados InSAR e imagens obtidas por drones, para um diagnóstico mais preciso e abrangente do comportamento estrutural de barragens.

Em conclusão, os drones representam uma ferramenta transformadora na segurança de barragens, facilitando o acesso a tecnologias avançadas de monitorização e estabelecendo as bases para uma nova era na avaliação destas estruturas. Os resultados obtidos demonstram o potencial

desta tecnologia para tornar as inspeções progressivamente mais eficientes, fiáveis e sustentáveis, contribuindo decisivamente para a proteção de vidas humanas e do ambiente.

8 – AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar a sua sincera gratidão ao proprietário da Barragem da Lapa por autorizar a utilização do local como estudo de caso e por permitir a publicação dos dados e conclusões relacionados. Esta colaboração foi essencial para demonstrar a aplicação prática da metodologia proposta.

Os autores reconhecem também o apoio prestado pela Universidade NOVA de Lisboa, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil e pela COBA – Consultores de Engenharia e Ambiente, cujas contribuições e financiamento foram fundamentais para viabilizar este trabalho.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bandeira, O.; Hitaka, J.; Leite, D.; Carvalho, R. (2018). *Intervention carried out in the Left Side Dam of the Pimental site of the Belo Monte HPP during the filling of the reservoir*. Dam World, <http://dx.doi.org/10.5281/ZENODO.4594763>
- CIAEA (2020). *Sumário executivo do relatório da investigação sobre o rompimento da Barragem 1 da mina do Córrego do Feijão*. Vale, Comitê Independente de Assessoramento Extraordinário de Apuração (Vale), Belo Horizonte. https://www.vale.com/documents/d/guest/20-02-20_ciaea_report_i-1
- CloudCompare (2025). *CloudCompare - Open Source project*. <https://www.cloudcompare.org/>
- Cruz, P. T. da (1996). *100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto*. Oficina de Textos, São Paulo.
- Cruz, S. I. C. da (2008). *Caracterização e utilização de solos dispersivos nos aterros compactados da barragem de Sobradinho*. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2584>
- DroneDeploy (2025). *DroneDeploy: Captura Robótica e IA para Qualidade, Segurança e Progresso*. <https://www.dronedeploy.com>
- DroneHarmony (2025). *Drone Harmony: Plataforma de Gestão de Dados e Operações de Drones*. <https://www.droneharmony.com>
- Dronelink (2025). *Dronelink: Controle de Voo de Drones e Automação de Missões*. <https://www.dronelink.com>
- DronEng (2023). *Material de Apoio - Topografia Com Drones - Ambiente Urbano*. DronEng, Belo Horizonte.
- Farah, M.; Alruwaili, A. (2024). *Optimizing Ground Sampling Distance for Drone-Based GIS Mapping: A Case Study in Riyadh, Saudi Arabia*. 9th International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE), Singapore. <https://doi.org/10.1109/ICRAE64368.2024.10851681>
- Fell, R. (2014). *Geotechnical engineering of dams*. CRC Press, Boca Raton.
- FEREC (1978). *Walter Bouldin Dam failure and reconstruction*. Report to the Federal Energy Regulatory Commission. <https://www.osti.gov/servlets/purl/6393036>

- Ferguson, K.; Anderson, S.; Sossenkina, E. (2014). *Reexamination of the 2004 Failure of Big Bay Dam, Mississippi*. , pp. 7–11, San Francisco, USA.
- Freire, O. N. J. (2022). *Autonomização de Software Open Source (WebODM) para Modelação e Mapeamento de Barragens com Drones*. Tese de Mestrado. Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, Portugal. <https://run.unl.pt/handle/10362/145188>
- Government of British Columbia (2025). *Module 3: Common Issues*. <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/environment/air-land-water/water/drought-flooding-dikes-dams/dam-safety/education-training/12021/module-3-common-issues>
- Guidicini, G.; Sandroni, S. S.; Mello, F. (2021). *Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragens e obras anexas no Brasil*. Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, Rio de Janeiro.
- Hanneman, D. (2023). *A.V. Watkins Dam backward erosion piping incident update*. Apresentação. National Dam Safety Program Technical Seminar, USA. <https://www.usbr.gov>
- Hardie, M.; Doyle, R.; Cotching, B.; Duckett, T.; Zund, P (2009). *Dispersive soils and their management: technical reference manual*. Dept. of Primary Industries and Water, Hobart, Tas. <https://nre.tas.gov.au>
- He, K.; Song, C.; Fell, R. (2021). *Numerical modelling of transverse cracking in embankment dams*. Computers and Geotechnics, vol. 132, pp. 104028. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104028>
- Ho, M.; O'Shea, D.; Wasko, C.; Nathan, R.; Sharma, A. (2025). *The impact of climate change on dam overtopping flood risk*. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, pp. 1–31.
- ICOLD (2018). *Bulletin 158 - Dam Surveillance Guide*. CRC Press, Florida, USA.
- ICOLD (2019). *World Declaration on Dam Safety*. <https://macold.org.mk/wp-content/uploads/2021/09/ICOLD-2019-declaration-on-dam-safety.pdf>
- Leite, D.; Marcelino, J.; Guerra, N.; Manso, J.; Sardinha, R. (2025). *Main failure modes in embankment dams, mappable with drone survey*. Proceedings of the Fifth International Dam World Conference, vol. 1, pp. 1145, Lisboa. <https://doi.org/10.34638/084d-e697>
- Leite, D.; Marcelino, J.; Manso, J. (2024). *Drones como Ferramenta de Inovação e Segurança na Observação de Barragens de Aterro*. 12º Congresso Luso-Brasileiro 8as Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia, vol. 1, pp. 373. https://www.researchgate.net/publication/386422775_Drones_como_Ferramenta_de_Inovacao_e_Seguranca_na_Observacao_de_Barragens_de_Aterro
- Leite, D. T.; Marcelino, J.; Gonçalves, S. (2020). *Application of Drones and OSS for Mapping and Visual Inspection of Embankment Dams*. Fourth International Dam World Conference, Lisbon. https://www.researchgate.net/publication/349929179_application_of_drones_and_oss_for_mapping_and_visual_inspection_of_embankment_dams
- LNEC (2024). *Barragem da Lapa. Inspeção visual de especialidade efetuada em janeiro de 2024 e avaliação do comportamento até agosto de 2024*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Mappa (2022). *Tudo sobre Pontos de Apoio: o que é, como usar e para que servem?*. <https://www.mappa.ag/blog/tudo-sobre-pontos-de-apoio-o-que-e-como-usar-e-para-que-servem/>
- Marcelino, J. (1996). *Modelação do colapso e da fluência em aterros*. Tese de Doutoramento. Universidade do Porto, Porto.

- Marcelino, J.; Freire, O.; Manso, J.; Leite, D.; Marques, N. (2022). *GCP Finder – Detecção Automática de Pontos de Controlo para Modelos Fotogramétricos*. 6as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2022, 12o Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Lisboa, Portugal.
- Medeiros, C. H. (2015). *Segurança de barragens e avaliação de riscos*. Painel: Lei da Segurança de Barragens e Avaliação de Riscos, vol. 1, pp. 41, Fortaleza.
- Mejia, L. H. (2013). *Analysis and design of embankment dams for foundation fault rupture*. Proceedings of 19th Symposium of the New Zealand Geotechnical Society, Queenstown, New Zealand,
- Mello, V. F. B. de (1982). *A case history of a major construction period dam failure*. Hommage au Professeur E.E. de Beer. Amici et Alumni, <https://www.victorfbdemello.com.br/arquivos/Publicacoes/093%20-%20A%20Case%20History%20of%20a%20Major%20Construction%20Period%20Dam%20Failure.pdf>
- Mello, V. F. B. de (1997). *Da importância de resgatar o passado, no caso de incidentes em barragens: o exemplo de Santa Branca*. Anais do CBGB, Rio de Janeiro. <https://repositorio.usp.br/item/003192611>
- Narita, K. (2000). *Design and construction of embankment dams*. Dept. of Civil Eng., Aichi Institute of Technology. <https://aitech.ac.jp/~narita/tembankmentdam1.pdf>
- OpenDroneMap™ (2025). *Download e Instalação do WebODM*. <https://webodm.org/download>
- Pix4D (2025). *Pix4D: Plataforma de Mapeamento Aéreo e Terrestre*. <https://www.pix4d.com>
- Quintela, A.; Pinheiro, A.; Gomes, A.; Afonso, J.; Almeida, J.; Cordeiro, M. (2001). *Curso de exploração e segurança de barragens*. Instituto da Água, Lisboa, Agência Portuguesa do Ambiente, Lisboa.
- Richards, K.; Doerge, B.; Pabst, M.; Hanneman, D.; O’Leary, T. (2015). *Evaluation and monitoring of seepage and internal erosion*. Edited by S. Leffel. Washington, DC: FEMA. https://damsafety.org/sites/default/files/files/FEMA_TM_EvalMonitorSeepageInternalErosn P1032-2015.pdf
- Robbins, B. A.; Sharp, M. K.; Corcoran, M. K. (2015). *Laboratory Tests for Backward Erosion Piping*. Geotechnical Safety and Risk V, IOS Press, , pp. 849–54.
- Sergio, L.; Ludimila, da S.; Luíz, G. (2025). *The Challenges of the Brazilian Electric Energy Regulatory Agency on Mitigate Effects from 2024 Rio Grande do Sul Floods*. Dam World, vol. 2, pp. 2481, Lisboa. <https://doi.org/10.34638/084d-e697>
- Sherard, J. L. (1986). *Hydraulic fracturing in embankment dams*. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 112 (10), pp. 905–27. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1986\)112:10\(905\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:10(905))
- Silveira, J. F. A. (2006). *Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento*. Oficina de Textos, São Paulo.
- Silveira, J. F. A. (2019). *Ruptura de barragens de terra-enrocamento*. Apresentação. Formação em segurança de barragens, UHE Belo Monte, Altamira.
- Souza, A. N. de (2017). *Análise do comportamento da barragem engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves-Açu/RN-durante sua construção, primeiro enchimento e operação do reservatório*. Tese de Mestrado. Brasil. <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/23444>

- Tosun, H.; Kılıbıyık, M. (2006). *Internal erosion resulted from dispersive soils in earthfill dams and a case study*. ASDSO National Dam Safety Conference. September, pp. 10–14,
- USACE (2022). *DLS208 M11 Brodhead Dam Case History (Internal Instability)*. <https://youtu.be/gM5X2q3O9aw?si=LjZwTO3S7CuGL8bZ>
- USBR (2019). *Internal Erosion Risks for Embankments and Foundations*. Apresentação. Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis, USA. <https://www.usbr.gov/damsafety/risk/BestPractices/Presentations/D6-InternalErosionRisksForEmbankmentsAndFoundationPP.pdf>
- USDA (2006). *Filter Diaphragms*. National Engineering Handbook - Part 628 Dams - Chapter 45 - , U.S. Department of Agriculture, USA. <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1720458755/Chapter%2045%20-%20Filter%20Diaphragms.pdf>
- Vu, B. T.; Van Pham, M.; Nguyen, D. Q.; Phan, D. C.; others (2023). *Understanding downstream slope failure in earth dams: causes and remedies-a case study of Trieu Thuong no. 2 dam, Quang Tri, Vietnam*. GEOMATE Journal, vol. 25, (108), pp. 163–71. <https://doi.org/10.21660/2023.108.3798>
- Wallace, L.; Arthur, C.; Howard, A.; Munson, W. (1976). *Failure of Teton Dam*. U. S. Department of the Interior And State Of Idaho, Washington.

