

165 novembro
noviembre
november
2025

GEOTECNIA



Sociedade Portuguesa de Geotecnia



Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica



Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica

50 ANOS
1971-2021

IMPRESA DA
UNIVERSIDADE
DE COIMBRA

EDITOR

Eduardo Fortunato, LNEC, Portugal

CO-EDITORES / CO-EDITORS

Alberto Sayão, PUC-Rio, Brasil

Fernando Pardo de Santayana, CEDEX, Espanha

EDITORES ASSOCIADOS / EDITORES ASOCIADOS / ASSOCIATE EDITORS

Ana Cristina Sieira, UERJ, Brasil

César Sagaseta, U. Cantabria, Espanha

José Estaire, CEDEX, Espanha

José Neves, IST, Portugal

Paulo Cesar Maia, UENF, Brasil

Sara Rios, FEUP, Portugal

A Revista Geotecnia foi publicada pela primeira vez em junho de 1971, com Úlpio Nascimento como fundador e José Folque como primeiro Diretor. Desde essa data tem vindo a publicar-se ininterruptamente. Em março de 2007 passou a ser editada conjuntamente pela SPG, ABMS e ABGE, desde março de 2011 pela SPG e ABMS e a partir de julho de 2014 pela SPG, ABMS e SEMSIG.

La Revista Geotecnia fue publicada por primera vez en junio de 1971, con Úlpio Nascimento como fundador y José Folque como primer Director. Desde esa fecha se viene publicando ininterruptamente. En marzo de 2007 pasó a ser editada conjuntamente por la SPG, la ABMS y la ABGE; desde marzo de 2011 por la SPG y la ABMS y a partir de julio de 2014 por la SPG, la ABMS y la SEMSIG.

"Geotecnia" was published for the first time in June 1971. Its founder was Úlpio Nascimento and its first Editor was José Folque. Since that date it has been continuously published. From March 2007 it became published jointly by the Geotechnical Societies of Portugal and Brazil: SPG, ABMS and ABGE. From January 2011 it was published by SPG and ABMS and, since June 2014 it is published by the Geotechnical Societies of Portugal, Brazil and Spain: SPG, ABMS and SEMSIG.

COMISSÃO EDITORIAL/COMISIÓN EDITORIAL/EDITORIAL BOARD

Antonio Gens Solé (U. P. Cataluña, Barcelona, Espanha)

António Viana da Fonseca (FEUP, Porto, Portugal)

Claudio Olalla Marañón (U. P. Madrid, Espanha)

Daniel Dias (U. Grenoble, França)

David Taborda (Imperial College, Londres, Reino Unido)

Diego Manzanal (U. P. Madrid, Espanha)

Eduardo Alonso Pérez de Ágreda (U. P. Cataluña, Barcelona, Espanha)

Emanuel Maranha das Neves (IST, U. Lisboa, Portugal)

Emílio Palmeira (U. Brasília, Brasil)

Enrique Asanza Izquierdo (CEDEX, Madrid, Espanha)

Euripedes Vargas (PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil)

Fernando Danziger (COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil)

Fernando Marinho (U. São Paulo, Brasil)

Fernando Schnaid (UFRGS, Porto Alegre, Brasil)

Helder Chaminé (ISEP, Porto, Centro GeoBioTec, U. Aveiro, Portugal)

Ignacio Pérez Rey (U. Vigo, Espanha)

Isabel Fernandes (FC, U. Lisboa, Portugal)

Joaquim Tinoco (U. Minho, Guimarães, Portugal)

Jorge Castro González (U. Cantabria, Santander, Espanha)

Jorge Zomberg (U. Texas, Austin, EUA)

José Luis de Justo Alpañés (U. Sevilla, Espanha)

José Vieira de Lemos (LNEC, Lisboa, Portugal)

Katia Bicalho (UFES, Vitória, Brasil)

Leandro Alejano Monge (U. Vigo, Espanha)

Luis Leal Lemos (FCT, U. Coimbra, Portugal)

Manuel Pastor Pérez (U. P. Madrid, Espanha)

Márcio S. Almeida (COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil)

Marcos Arroyo Álvarez de Toledo (U. P. Catalunya, Barcelona, Espanha)

Margarida Pinho-Lopes (U. Aveiro, Portugal)

Marina Bellaver Corte (PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil)

Michèle Casagrande (U. Brasília, Brasil)

Nilo Consoli (UFRGS, Porto Alegre, Brasil)

Nuno Cristelo (UTAD, Vila Real, Portugal)

Pablo Mira McWilliams (CEDEX, Madrid, Espanha)

Paulo da Venda Oliveira (FCT, U. Coimbra, Portugal)

Pedro Alves Costa (FEUP, Porto, Portugal)

Rafael Jiménez Rodríguez (U. P. Madrid, Espanha)

Ramón Verdugo Alvarado (U. Chile, Santiago de Chile, Chile)

Renato Cunha (U. Brasília, Brasil)

Ricardo Oliveira (CÓBA/LNEC/UNL, Lisboa, Portugal)

Roberto Coutinho (UFP, Recife, Brasil)

Roberto Tomás Jover (U. Alicante, Espanha)

Rubén Ángel Galindo Aíres (U. P. Madrid, Espanha)

Tácio M.P. Campos (PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil)

Tarcísio B. Celestino (U. São Paulo, São Carlos, Brasil)

Willy A. Lacerda (COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil)

**SPG**

A/c LNEC
Av. do Brasil, 101
1700-066 Lisboa, Portugal
Tel.: (+351) 21 844 3859
Fax: (+351) 21 844 3021
E-mail: spg@lneec.pt
<http://www.spgeotecnia.pt>

**ABMS**

Av. Queiroz Filho, 1700 – Torre A,
Sala 106
05319-000 São Paulo, SP, Brasil
Tel.: (+55 11) 3833 0023
E-mail: abms@abms.com.br
<http://www.abms.com.br>

**SEMSIG**

CEDEX, Laboratório de Geotecnia
C/ Alfonso XII, 3
28014 Madrid, Espanha
Tel.: (+34) 91 335 7500
Fax: (+34) 91 335 7322
E-mail: info@semsig.org
<http://www.semsig.org>

- 3** Metodologia BIM e gémeos digitais em barragens de aterro: Conceitos e revisão da literatura
BIM methodology and digital twins in embankment dams: Concepts and literature review
Alexandra Rosa,
Miguel Azenha,
Joana Carreto
- 35** Sellado adsorbente de base de vertedero para la gestión de PFAS: Desafíos y soluciones con geotextiles
Adsorptive landfill base sealing for PFAS risk management: Challenges and geotextile solutions
Marco Rodriguez,
Stefan Niewerth,
James Feest,
Gus Martins
- 53** Impacte do modo de corte cíclico no comportamento de amostras reconstituídas de rejeitados de volfrâmio
Impact of cyclic shear mode on the behaviour of reconstituted tailings samples
João Pedro Oliveira,
Luis Araújo Santos,
Paulo Coelho
- 77** El papel de la geología estructural en los grandes deslizamientos de la autovía A7 en Granada
The role of structural geology in the major landslides on the A7 motorway in Granada
Javier González-Gallego,
Javier Moreno Robles,
Alberto Fernandez,
Jose Luis García de la Oliva,
Carlos de las Heras
- 93** Drones como ferramenta complementar na segurança de barragens de aterro
Drones as a complementary tool for embankment dam safety
Daniel Leite,
João Marcelino,
Nuno Guerra,
João Manso
- 125** El ensayo de penetración dinámica de energía variable para estimar la calidad de la banqueta de balasto
Variable energy dynamic penetration test to estimate quality of ballast bed
Natalia Montero-Cubillo,
José Estaire

METODOLOGIA BIM E GÉMEOS DIGITAIS EM BARRAGENS DE ATERRO: CONCEITOS E REVISÃO DA LITERATURA

BIM methodology and digital twins in embankment dams: concepts and literature review

Alexandra Rosa^a, Miguel Azenha^b, Joana Carreto^a

^a Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

^b Universidade do Minho, ISISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal.

RESUMO – A evolução da metodologia *Building Information Modelling* (BIM) e a sua extensão aos gémeos digitais têm sido exploradas na indústria da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) para otimizar fluxos de trabalho, melhorar a comunicação e partilhar/estruturar informação, apoiando tomadas de decisão mais informadas. Apesar dos benefícios evidentes, a sua aplicação às barragens de aterro é ainda incipiente. Este estudo apresenta uma revisão do estado da arte neste contexto. São discutidos diversos aspetos do BIM, como a modelação 3D, requisitos de informação, recolha e organização de dados, planeamento e gestão e otimização de custos. Aborda-se também o papel dos gémeos digitais na monitorização estrutural, a integração com IoT, o desenvolvimento de modelos preditivos e a gestão da informação através de plataformas, a integração de bases de dados e o recurso à interoperabilidade semântica. Esta análise termina com a identificação de desafios e lacunas de investigação, oferecendo pistas relevantes para futuros trabalhos de investigação e aplicação.

ABSTRACT – The evolution of the Building Information Modelling (BIM) methodology and its extension to digital twins have been extensively explored by the AECO industry. They facilitate the optimization of workflows, improve communication, and enable the sharing and structuring of information, thereby supporting more informed decision-making. Despite their clear benefits, their application to embankment dams remains in its early stages. This study presents a comprehensive review in this context. Several BIM features are discussed, including 3D modelling, information requirements, data acquisition and organization, planning, quantity take-off, and cost management. The role of digital twins in structural monitoring is also examined, including the integration of IoT technologies and the development of predictive models. Information management is achieved through platforms, database integration, and the use of semantic interoperability, with their advantages also outlined. This analysis ends with the identification of challenges and knowledge gaps, providing valuable insights for future research.

Palavras Chave – modelação da informação da construção (BIM), gémeos digitais, barragens de aterro.

Keywords – building information modelling (BIM), digital twins, embankment dams.

E-mails: aorosa@lnec.pt (A. Rosa), miguel.azenha@civil.uminho.pt (M. Azenha), jcarreto@lnec.pt (J. Carreto)

ORCID: orcid.org/0009-0003-7667-3412 (A. Rosa), orcid.org/0000-0003-1374-9427 (M. Azenha), orcid.org/0000-0002-3602-3939 (J. Carreto)

1 – INTRODUÇÃO

A digitalização da construção é uma área científica que tem recebido bastante atenção nos últimos anos devido ao seu potencial para melhorar a comunicação, a colaboração e a partilha de informação entre os diversos intervenientes na indústria da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AEEO). A integração do *Building Information Modelling* (BIM), ou Modelação de Informação da Construção, com os *digital twins* (DT), ou gémeos digitais, constitui um elemento-chave desta tendência, com recomendações e normas a serem progressivamente difundidas em todo o mundo. De facto, vários países como o Reino Unido, a Noruega, a Suécia, a Finlândia, a Dinamarca, a Austrália, Singapura e os Emirados Árabes Unidos, etc., já tornaram obrigatória a utilização da metodologia BIM para a conceção e realização de obras públicas (Shah, 2025).

Apesar das inúmeras vantagens demonstradas pela quantidade de casos de estudo referentes a edifícios, a aplicação dos gémeos digitais e do BIM às estruturas geotécnicas, e nomeadamente às barragens de aterro, ainda se encontra numa fase inicial. A integração deste tipo de inovações tecnológicas numa área específica da Engenharia Civil, como as barragens de aterro, requer a colaboração entre entidades da informática, profissionais especializados em barragens de aterro e organismos normativos.

Em Portugal, a publicação da Portaria n.º 255/2023 de 7 de agosto, assinala a importância e recomenda o recurso à “modelação digital de dados de construção” por intermédio da metodologia BIM, na elaboração dos projetos de obras públicas, incluindo a definição dos requisitos de informação e níveis de desenvolvimento, a descrição e atribuição de responsabilidades no contexto BIM, o faseamento construtivo no modelo e a descrição do fluxo de trabalhos bem definidos. Acresce o comunicado do Conselho de Ministros de 25 de setembro de 2023, com a Estratégia Nacional para a Implementação da Metodologia BIM (PortugalBIM), que surge como resposta à necessidade de criar mecanismos de apoio à adoção do BIM.

A necessidade de gerir infraestruturas envelhecidas, como é o caso do parque de barragens em Portugal, de uma forma holística e mais eficaz, estimulou o desenvolvimento de novas abordagens para dimensionar, construir, explorar e monitorizar estes ativos, aos quais o conceito de gémeos digitais está estreitamente associado. Neste contexto, torna-se, portanto, fundamental avaliar e sintetizar o estado da arte, tanto em Portugal como a nível internacional, relativamente à aplicação do BIM e dos gémeos digitais nas barragens de aterro, de forma a identificar lacunas, desafios, progressos e oportunidades para a sua implementação futura.

2 – METODOLOGIA

Para esta revisão foi dada preferência à consulta de artigos científicos, artigos publicados em conferências, relatórios técnicos e dissertações extraídos de páginas científicas como o Google Scholar, Scopus e Web of Science. Complementarmente, foram consideradas fontes provenientes de websites institucionais e de empresas do setor.

As principais palavras-chave utilizadas nessa pesquisa, tanto em inglês como nas respetivas traduções para português, no singular e nos seus plurais, foram combinadas para ampliar a abrangência dos resultados e as suas combinações (Quadro 1). A título de exemplo, foram feitas pesquisas utilizando os termos BIM + Barragem, BIM + Dam, Digital Twins + Barragem, etc.

Foram também pesquisadas publicações com base nas referências bibliográficas de trabalhos previamente analisados na íntegra, incluindo documentos redigidos em inglês, português e espanhol.

Inicialmente, delimitou-se temporalmente a pesquisa para documentos entre 2010 e 2025 para garantir a inclusão das tecnologias mais recentes. No entanto, dada a escassez de estudos específicos sobre barragens de aterro, estendeu-se essa consulta até ao ano 2000. Neste sentido, considerou-se pertinente incluir na pesquisa a análise de outras infraestruturas, tais como pontes e outras infraestruturas maioritariamente geotécnicas – túneis, estradas e ferrovias. Estas estruturas partilham várias características com as barragens, nomeadamente a elevada complexidade construtiva, a

necessidade de coordenação multidisciplinar, uma vida útil longa e a exigência de monitorização contínua para garantir a segurança e o seu desempenho. Apesar da maturidade do BIM e dos gémeos digitais nestes sectores não ser tão abrangente como a dos edifícios, estas oferecem exemplos de práticas que podem ser adaptadas ao contexto das barragens de aterro.

Quadro 1 – Principais palavras-chave pesquisadas.

Temas	Inglês	Português
BIM	Building Information Modelling (BIM)	Modelação de Informação da Construção
Gémeos Digitais	Digital Twin, DT	Gémeo Digital
Barragens	Dam, Embankment dam	Barragem, Barragem de aterro
Gestão/Management	Management, Data Management, Asset management, Infrastructure management, Platform, Ontology	Gestão, Gestão de dados, Gestão de ativos, Gestão de infraestruturas, Organização da informação, Plataforma, Ontologia
Inspeção/Inspection	Inspection, Monitoring, Internet of Things (IoT)	Inspeção, Monitorização
Segurança/Safety	Safety Assessment, Finite Element Analysis (FEA)	Segurança, Método dos Elementos Finitos (MEF)

Numa fase preliminar, foram selecionadas as publicações que continham as palavras-chave no título e no resumo. Usando uma abordagem qualitativa, com base no teor e no grau de especificidade dos resumos e do objetivo definido no início deste capítulo, as publicações foram categorizadas segundo estes temas:

- Evolução do BIM e dos gémeos digitais na engenharia civil
- Diferenças entre um modelo BIM e um gémeo digital
- Gestão da informação e integração de sistemas
- BIM nas barragens de aterro
- Gémeos digitais nas barragens de aterro.

Após uma leitura geral dos documentos, as publicações foram avaliadas, considerando a relevância temática, o tipo de aplicação (modelação geométrica, integração com sensores, gestão de informação, simulação, etc.), o grau de detalhe (conceptual, descritivo ou prático), as tecnologias utilizadas (*softwares*, plataformas, bases de dados, ontologias, etc.) e os casos de estudo; as publicações que cumpriam estes critérios foram então analisadas em maior detalhe, de modo a garantir a sua elegibilidade para este estudo.

3 – ANÁLISE CRÍTICA DO ESTADO DA ARTE

3.1 – Evolução do BIM e dos Gémeos Digitais na Engenharia Civil

A origem do termo *Building Information Modelling* (BIM) não é clara, mas designações semelhantes foram identificadas em publicações tais como, *Building Product Model* por Eastman (1975) ou *Building Modelling* por Aish (1986). O desenvolvimento de desenhos assistidos por computador (CAD) surgiu como resposta às limitações dos métodos tradicionais de desenho, mais suscetíveis a erros e mais demorados de produzir ou modificar (Azenha et al., 2023), bem como à crescente necessidade de integrar múltiplos elementos de projeto num sistema unificado. Estes

sistemas evoluíram de ferramentas utilizadas de forma isolada por cada especialidade da construção para plataformas integradas, nas quais todos os intervenientes trabalham sobre uma base comum. Esta integração permite uma coordenação mais eficaz e a atualização simultânea dos elementos do projeto ao longo do ciclo de vida da obra, contribuindo para uma maior eficiência dos processos envolvidos (Aish, 1986).

Desde então, o BIM evoluiu significativamente e as três palavras que dão origem ao seu acrónimo – *Building, Information e Modelling* – constituem componentes essenciais para qualquer projeto de construção, segundo Azenha et al. (2023). O BIM baseia-se na aplicação de uma metodologia, conforme definido pela NP EN ISO 19650-1 (2025), que (1) otimiza a colaboração e comunicação entre intervenientes e (2) fornece uma abordagem estruturada e integrada de organizar processos e informação durante o ciclo de vida da obra, “formando uma base confiável de apoio à decisão”.

Ao longo dos anos, foram publicadas várias revisões sistemáticas da literatura, cada uma abordando diferentes particularidades da aplicação da metodologia BIM, seja em termos de processos, especialidades ou tipos de estruturas na engenharia civil. Destacam-se métodos de partilha de informação BIM (Lou et al., 2020), integração e colaboração no BIM (Ali et al., 2022), gestão de ativos (Koumou e Isafiade, 2024; Saback et al., 2022), propósitos BIM (Shishehgharkhaneh et al., 2022) e desafios na fase de projeto (Silva et al., 2024). No domínio das barragens destacam-se Hasan et al. (2023), que efetuam uma análise de tecnologias para avaliação de custos na construção de barragens de betão, e Wahyuningrum et al. (2020) e Wangchuk et al. (2024) que abordam as vantagens da implementação do BIM para barragens e para infraestruturas hidroelétricas, respetivamente.

Segundo Jiang et al. (2019), o crescimento do número e da complexidade dos projetos de engenharia veio revelar uma necessidade premente de aumentar o nível de colaboração entre diferentes intervenientes e plataformas referentes a um projeto de construção. A abordagem OpenBIM surge neste contexto e vem facilitar a gestão da informação, através da definição de requisitos normalizados para a representação, partilha, armazenamento e consulta da informação, garantindo a interoperabilidade desejada. Na base do OpenBIM surgem as IFC (*Industry Foundation Classes*), desenvolvidas pela buildingSMART. A buildingSMART International é um “organismo mundial que impulsiona a transformação digital da indústria da construção”, (...) “através da criação e adoção de normas e soluções abertas e internacionais para infraestruturas e edifícios” (buildingSMART Portugal, 2022).

As IFC constituem um conjunto de especificações abertas e globais para representar digitalmente ativos construídos, definidas num formato neutro e normalizado (ISO 16739-1, 2024), cuja extensão tem o mesmo nome “.ifc”. Este formato permite que a informação possa ser partilhada, interpretada e utilizada de forma consistente entre diferentes plataformas, aplicações e pessoas. Atualmente, a versão em vigor é a IFC 4.3 ADD2, sendo possível consultar as atualizações diretamente na base de dados das especificações IFC, disponível no site oficial da buildingSMART.

A origem do conceito de gémeos digitais data de 2002, e foi apresentado durante uma formação no centro de Gestão do Ciclo de Vida do Produto (*Product Lifecycle Management* – PLM), na Universidade do Michigan pelo Dr. Michael Grieves (Grieves e Vickers, 2016). A proposta inicial do conceito continha três componentes: o objeto físico, o objeto virtual e um mecanismo de partilha de dados/informação entre ambos, como representado na Figura 1 (Ali et al., 2022; Grieves, 2014). Por se tratar de um conceito ainda em fase embrionária, as limitações tecnológicas, como a baixa potência computacional ou a dificuldade de garantir a conectividade dos dispositivos à internet, e a imaturidade da disciplina de gestão de dados dificultaram a disseminação prática do conceito (Singh et al., 2021).

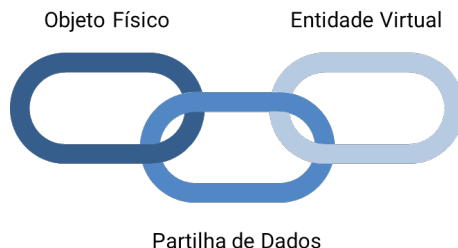


Fig. 1 – Principais componentes de um gêmeo digital.

O termo como é hoje conhecido surgiu em 2010 num plano estratégico tecnológico apresentado pela NASA como um dos grandes desafios técnicos a superar com o título “*Simulation-Based Systems Engineering: NASA Digital Twin*” (Shafto et al., 2010). A ideia por detrás desta definição é que um gêmeo digital é uma simulação integrada, multi-física, multi-escala e probabilística de um veículo ou sistema, que utiliza os melhores modelos físicos disponíveis, atualização de sensores, registos de manutenção e de dados, entre outros, para replicar o ciclo de vida do seu homólogo real. Os sistemas do gêmeo digital seriam capazes de mitigar danos ou a degradação na entidade real, recomendando alterações nesse sentido. De acordo com Wright e Davidson (2020), os gémeos digitais são particularmente úteis para objetos que evoluem ao longo do tempo, auxiliando na monitorização, simulação, previsão e otimização de processos, etc. (Tao et al., 2022).

Segundo Hananto et al. (2024), desde 2014, os gémeos digitais expandiram-se para além da aviação e encontraram aplicações noutros sectores (como na produção industrial, na saúde, etc.), incluindo na engenharia civil. A popularidade dos gémeos digitais é evidente na Figura 2 que mostra o número de publicações que mencionam o termo *gêmeo digital* no título, resumo ou palavras-chave de um artigo, considerando apenas publicações em inglês provenientes de bases de dados Scopus e ScienceDirect (Singh et al., 2021).

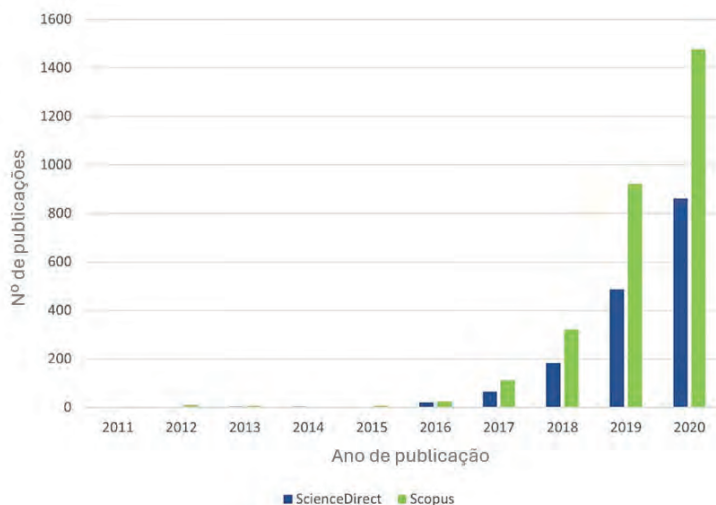


Fig. 2 – Número de publicações relacionadas com gémeos digitais publicadas entre 2011 e 2020 no Scopus e no ScienceDirect, adaptado de Singh et al. (2021).

De acordo com Broo e Schooling (2023), os vários componentes de um gêmeo digital podem contribuir para uma representação abrangente e dinâmica de um ativo físico e contribuir para decisões bem fundamentadas e baseadas em dados obtidos ao longo do ciclo de vida do ativo. Estes componentes incluem o modelo 3D com geometria e metadados, sensores IoT (*Internet of Things*)

que recolhem dados em tempo real do ativo, formulários (*templates*) para organizar e estruturar os dados recolhidos, algoritmos de inteligência artificial e *machine learning* que, através da análise de dados, conseguem fornecer informações baseadas no registo histórico da documentação do projeto e nos eventos ocorridos durante as fases de construção e exploração e até mesmo, dados sobre o desempenho do ativo.

Apesar do crescimento dos gémeos digitais ter sido impulsionado pelo desenvolvimento de avanços tecnológicos, como o IoT, a inteligência artificial (IA), o *big data*, *machine learning*, plataformas, *clouds*, ambientes de dados comuns, modelação 3D, etc., foi também condicionado pela imaturidade dessas tecnologias, que ainda requerem investigação adicional para permitir explorar plenamente o potencial oferecido pelos gémeos digitais (Tao et al., 2022).

3.2 – Diferenças entre um Gémeo Digital e um modelo BIM

Os termos “modelo BIM” e “gémeo digital” são frequentemente mencionados em conjunto, nomeadamente no domínio da engenharia civil. Embora sejam distintos, eles estão interligados e a sua relação é crucial para a transformação digital na indústria da AECO.

Apesar de existirem diferentes interpretações do que representa um gémeo digital (Wright e Davidson, 2020), a definição mais aceite na comunidade científica estabelece que os dados devem fluir entre o objeto real e o digital, permitindo uma interação bidirecional em tempo real. Ou seja, uma alteração no objeto físico gera automaticamente uma alteração no objeto digital, e vice-versa. Por oposição, num modelo digital (também designado por modelo BIM) a partilha de dados é feita de forma manual nos dois sentidos, por isso, uma alteração no objeto real não tem efeito no seu homólogo digital.

Existe ainda um conceito que combina características dos dois modelos anteriores: *digital shadow* (sombra digital). Neste caso, os dados fluem automaticamente, mas de forma unidirecional entre o objeto real e o seu correspondente digital. Isso significa que qualquer alteração no objeto físico é refletida no objeto digital, mas alterações no objeto digital não afetam o objeto real (Fuller et al. (2020)). Uma representação destes três conceitos encontra-se esquematizada na Figura 3.

Assim, um modelo BIM pode servir de base para o desenvolvimento de um gémeo digital que, complementado pelas mais recentes tecnologias digitais, permite uma integração de dados em tempo real, a realização de análises preditivas e a possibilidade de impactar diretamente o objeto físico.

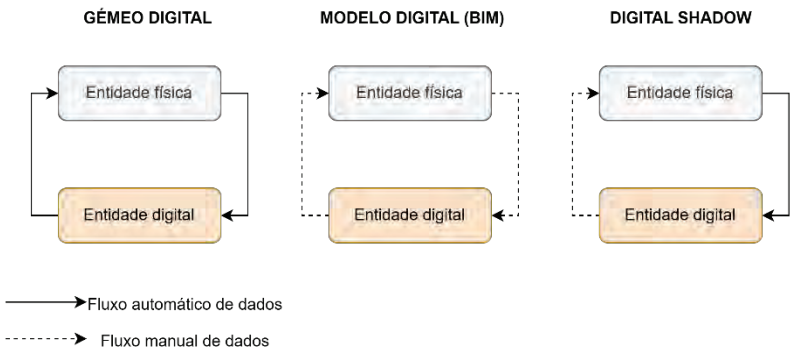


Fig. 3 – Diferenças entre um gémeo digital, um modelo digital (BIM) e uma *digital shadow*.

De acordo com Singh et al. (2021), uma tendência futura em franco desenvolvimento é o que se designa por *triplets* (trigêmeos) digitais que têm como base os gémeos digitais, mas distinguem-se por incluírem uma terceira camada que permite prever e simular cenários futuros. Esta terceira camada recorre a tecnologias como *machine learning*, inteligência artificial e análise avançada de

dados para modelar o estado hipotético ou futuro do ativo, antecipando eventuais alterações e contribuindo para uma tomada de decisão mais proactiva e para a otimização do mesmo ao longo do seu ciclo de vida.

3.3 – BIM nas barragens de aterro

3.3.1 – Propósitos BIM

A implementação da metodologia BIM em projetos de barragens de aterro requer a identificação dos propósitos BIM mais adequados, conforme descrito no Guia de Planeamento para a Execução de Projetos BIM (Messner et al., 2019). A definição dos propósitos é feita com base nos objetivos do projeto, nas fases do ciclo de vida e nas atividades habituais associadas a este tipo de estrutura, de forma a clarificar que processos irão beneficiar da implementação do BIM e com que objetivo é que a informação do modelo irá ser usada.

O Quadro 2 apresenta uma proposta para as principais fases do ciclo de vida de uma barragem de aterro – projeto, construção, primeiro enchimento e exploração (adaptado de Rosa et al. (2024) e Serra (2022)). Estes propósitos são explorados de forma transversal ao longo das secções seguintes, que abordam diferentes perspetivas e ferramentas relevantes para a sua aplicação a barragens de aterro ou a outro tipo de infraestruturas em que os conceitos discutidos possam ser relevantes.

3.3.2 – Modelação 3D

A modelação 3D pode ter várias dimensões tais como a geração do modelo da barragem, da sua fundação, a modelação de dispositivos, de equipamentos ou inclusive de ocorrências/anomalias observadas durante uma inspeção visual.

Atualmente, não existe nenhum *software* de desenho tridimensional criado para modelar barragens que tenha em conta as necessidades inerentes à modelação de uma barragem de aterro que, para além do corpo da barragem, requer, inequivocamente, a modelação da sua fundação.

O *software* mais utilizado para a construção deste tipo de estruturas, referido na maior parte das publicações, é o Revit da Autodesk.

Uma das referências relativamente à implementação do BIM nas barragens de aterro no campo da avaliação de segurança estrutural é Heleno (2021). A autora modelou a geometria da barragem de Odelouca (Algarve) em Revit, desenvolvendo um código em programação visual em Dynamo (Autodesk). Este código permite a geração dos principais constituintes do corpo da barragem (núcleo, maciços de montante e jusante e filtro-chaminé) através da leitura de uma base de dados em Excel que contém a informação geométrica (pontos). Na modelação tridimensional, os elementos mais básicos começam com a introdução de pontos que, ligados, dão origem a polígonos e posteriormente a sólidos (no Revit são referidos como “massas”). Fernandes (2015) aplicou um método similar, mas a barragens de betão ou galerias.

Cortijo García et al. (2021) abordaram também a modelação de uma barragem de betão, mas tendo em consideração o seu faseamento construtivo. Os blocos de betão foram modelados fixando a sua largura e altura, numa dimensão equivalente à espessura da camada de betão a betonar. A consideração do faseamento construtivo na modelação das estruturas permite controlar de forma mais eficiente as atividades, as quantidades e os custos durante a execução da obra e também garantir um registo histórico que permita, no futuro, cruzar informação, caso seja necessário.

Este método pode ser aplicado às barragens de aterro considerando os principais constituintes do seu corpo (núcleo, maciços, filtros, drenos e proteção de talude) como blocos com a altura equivalente à espessura da camada a compactar. Embora não seja mencionado nas publicações científicas, é importante referir que, para barragens de aterro, é fundamental considerar, na modelação, as alterações de geometria ao longo do tempo, nomeadamente durante a fase de construção, com vista a obter um modelo mais rigoroso representativo de um gémeo digital.

Quadro 2 – Exemplos de propósitos BIM nas principais fases de vida de uma barragem de aterro (adaptado de Rosa et al. (2024) e Serra (2022)).

Propósito BIM	Fases		
	Projeto	Construção	Primeiro enchimento, Exploração
Modelação tridimensional da barragem/fundação	x	x (introdução de eventuais alterações ao modelo)	x (barragens existentes)
Deteção de incompatibilidades entre diferentes especialidades no modelo BIM	x	x	-
Federação do modelo BIM	x	-	-
Registo e visualização de sondagens/ resultados de ensaios no modelo BIM	x	x	x (para diagnóstico)
Planeamento do faseamento construtivo (visualização e atualização)	x	x	-
Cálculo de quantidades e orçamentos	x	x	-
Registo e visualização de resultados de monitorização no modelo BIM	-	x	x
Visualização de notificações relacionadas com o comportamento da barragem no modelo BIM	-	x	x
Registo e visualização de ocorrências no modelo BIM	-	x	x
Preparação de formulários de inspeção e relatórios	-	-	x
Análise de modelos preditivos e definição de critérios de alerta	x	x	x

Relativamente a barragens existentes, ferramentas alternativas para a digitalização e geração de modelos 3D são as tecnologias de deteção remota (LiDAR, fotogrametria, etc.), obtendo-se uma nuvem de pontos cuja malha pode ser convertida num sólido ou superfície.

Apresentam-se alguns exemplos, como Hendriatiningsih et al. (2021) que utilizaram o método TLS (*Terrestrial Laser Scanning*) para obter uma nuvem de pontos a fim de modelar uma barragem de betão. Concluíram que o TLS não recolhe pontos com a precisão necessária à adequada definição de pequenos objetos como bombas hidráulicas e tubagens, sendo necessário complementar o levantamento recorrendo ao HLS (*Handheld Laser Scanner*), conforme apresentado na Figura 4.

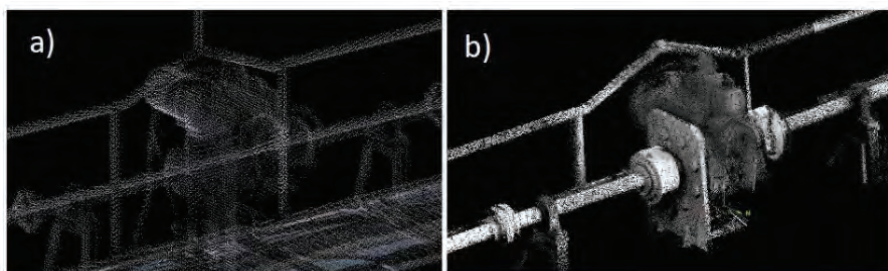


Fig. 4 – Levantamento realizado com: a) TLS; b) HLS (Hendriatiningsih et al. (2021)).

Em zonas remotas ou de acesso condicionado, o levantamento aéreo por laser (ALS) é também uma solução, tendo sido utilizado com sucesso por Smith (2012) para gerar o modelo digital de barragens de aterro.

Os levantamentos e os modelos tridimensionais de uma barragem, obtidos ao longo do tempo, podem também ser utilizados para detetar ocorrências e padrões de deformação, através da comparação entre os diferentes modelos produzidos em momentos distintos (Xiao et al., 2022).

A influência da presença de vegetação (densa ou não) na precisão das tecnologias de deteção remota foi abordada apenas de forma superficial pelo primeiro autor, que recorreu a uma solução manual nas zonas com definição insuficiente para a modelação da estrutura. A compreensão deste aspeto é essencial para a aplicação eficaz destas tecnologias no levantamento de barragens de aterro, onde a vegetação, frequentemente não controlada, pode crescer de forma extensa.

Relativamente à fundação, El Sibaii (2020) apresentou um caso real para o qual desenvolveu um programa em Dynamo, que lia os dados geológico-geotécnicos extraídos de sondagens e colocados num *template* previamente estruturado, e criava o modelo 3D dessas sondagens. Com base nas mesmas, conseguiu modelar camadas de fundação tridimensionais com a informação necessária à correta definição do material intrínseco. Esse modelo foi posteriormente exportado para IFC.

Software proprietário como o Rockworks (da Rockware) inclui uma ferramenta que gera automaticamente o modelo 3D e que o utilizador pode ajustar. Esta ferramenta lê uma folha de Excel preparada pelo próprio com base na informação dos logs das sondagens (Figura 5). No entanto, este *software* não permite a importação nem a exportação de ficheiros diretamente compatíveis com softwares BIM, como os formatos “.rvt” (do Revit) ou “.ifc”.

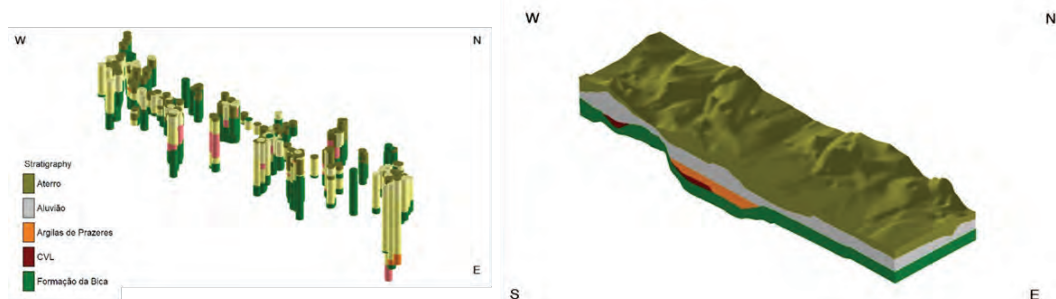


Fig. 5 – Modelo digital de terreno (MDT) em 3D feito com base na informação dos *logs* das sondagens utilizando o Rockworks.

Apesar de fora deste âmbito, importa referir que as tecnologias da Realidade Virtual (RV) e da Realidade Aumentada (RA) permitem uma visualização mais realista e imersiva do modelo 3D. Estas tecnologias servem de apoio durante a fase de construção e de monitorização de barragens novas e existentes.

Finalmente, a modelação deve seguir um conjunto de regras que têm como objetivo garantir uniformidade entre diferentes entidades para que haja a tão desejada interoperabilidade. Em Portugal, destaca-se o guia “Regras de Modelação de Objetos BIM” (CT197, 2021). Nesse documento são referidos documentos internacionais que se consideram úteis, como o *UK NBS BIM Object Standard* (NBS, 2023) no Reino Unido, ou a *OBOS Open BIM Object Standard*, na Austrália e Nova Zelândia (NATSPEC e MasterSpec (2018) e CT197 (2021)).

3.3.3 – Requisitos de informação e normalização em fluxos de trabalho BIM

Um dos principais objetivos do desenvolvimento ou utilização de um modelo BIM é integrar a informação necessária ao longo das várias fases do ciclo de vida de uma obra. O nível de complexidade, o nível de desenvolvimento e a grande quantidade de dados envolvidos implicam uma organização ou sistematização normalizada dos elementos/atividades (Serra, 2022). Este capítulo apresenta vários componentes do ecossistema BIM necessários para alcançar o objetivo referido. Estes elementos podem ou não estar interligados e, para clarificar a sua aplicação e relações, encontram-se resumidos na Figura 6.

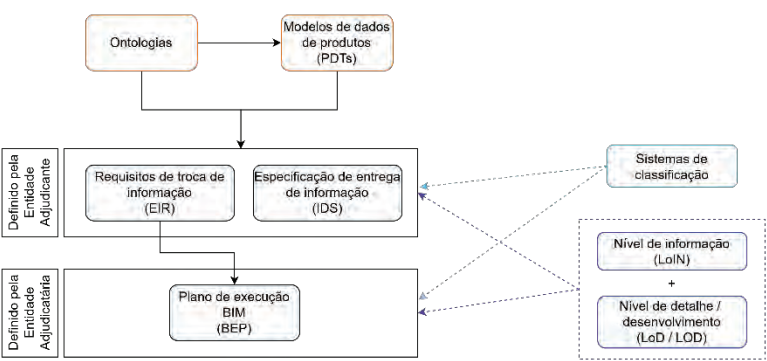


Fig. 6 – Alguns dos elementos do ecossistema BIM que contribuem para a organização e gestão da informação.

Uma vez que as vantagens das ontologias são amplamente reconhecidas pelo público em geral, e por não estarem diretamente relacionadas com o BIM, serão abordadas com maior detalhe no capítulo 3.4.2.

Os modelos de dados de produtos (*Product Data Template* – PDT) a integrar no modelo BIM contêm um conjunto de características consideradas relevantes para a descrição de objetos da construção, contribuindo para a uniformização e consistência da sua definição na indústria, num formato interoperável. Apesar das iniciativas existentes para desenvolver PDTs, nenhuma, contendo o formato aberto, cumpre os critérios da NP EN ISO 23386 (2020) e da ISO 23387 (em publicação) (Azenha e Sibaii, 2024).

Apresenta-se o trabalho desenvolvido por El Sibaii et al. (2022) sobre a criação de um BDT – *Borehole Data Template*, relativo a uma sondagem. Este modelo foi aplicado num caso de estudo e a informação dele resultante foi incorporada no modelo BIM, esquematizada na Figura 7. O mesmo autor é um dos responsáveis pelo desenvolvimento da plataforma portuguesa pdts.pt (Universidade do Minho, 2021), de acesso aberto.

Um documento que contribui para o aumento da eficiência na colaboração e execução de uma barragem de aterro, com base na metodologia BIM, é o EIR (*Exchange Information Requirements*) que contém, como o nome indica, os requisitos de troca de informação. Nele deve constar toda a informação uniformizada relativa a aspetos contratuais e comerciais, assim como os métodos de

produção e procedimentos a serem implementados pela Entidade Adjudicatária, como definido na NP EN ISO 19650-1 (2025). É importante realçar que a CEN/TR 17654 (2021) fornece recomendações sobre como implementar o EIR e o Plano de Execução BIM ao nível europeu, com base na EN ISO 19650-1 (2018) e na EN ISO 19650-2 (2018). Ao momento, a buildingSMART Portugal desenvolveu dois documentos exemplificativos de um EIR em português para a fase de projeto de uma obra privada (Granja et al., 2024b) e de uma obra pública (Granja et al., 2024a).

Dentro dos requisitos de informação, a norma NP EN ISO 19650-1 (2025) estabelece a necessidade de definir o *Level of Information Need* (LoIN) como parte integrante da gestão da informação em BIM.

Um dos objetivos da definição do LoIN é evitar a entrega de informação excessiva, assegurando que, no momento da entrega, apenas seja disponibilizada a informação necessária e relevante, adequada ao objetivo específico estabelecido. A norma NP EN ISO 7817-1 (2024) estabelece os conceitos e princípios para a definição do LoIN e das entregas da informação de forma consistente, no contexto da utilização do BIM. Define a extensão e a granularidade da informação, descrevendo as características necessárias que serão tanto ou mais detalhadas ao longo do ciclo de vida do ativo, como apresentado na Figura 8. Essa informação, que deve estar documentada, divide-se em informação geométrica e alfanumérica.

Nome do modelo	Sondagem		
Categoria do modelo	Obras Geotécnicas		
Aptidão para uso	Geotechnical engineering – BIM		
Nome do parâmetro	Valor	Unidades	Notas
Dados gerais			
NomeDoProjeto		Alfanumérico	Nome dado ao projecto relacionado com o sondagem.
ZonaSismica		Alfanumérico	A zona sísmica onde se situa o sondagem. Ex. Zona (1, 2A, 2B, 3, 4)
ProfundidadeTotalDaSonda		Número	A profundidade total do sondagem.
SistemaDeCoordenadas		Texto	O sistema de coordenadas utilizado para especificar a localização do sondagem (campo obrigatório).
Etc.		Etc.	Etc.
Distribuição das camadas da sondagem			
Dados da camada de solo			
Descrição da camada de solo			
-	-	-	-
Resultados dos Ensaios Laboratoriais			
-	-	-	-
Resultados dos Ensaios In-Situ			
-	-	-	-
Dados da camada de vazio			
-	-	-	-
Dados da camada de água			
-	-	-	-
Dados da camada de rocha			
Descrição da camada de rocha			
-	-	-	-
Resultados dos Ensaios Laboratoriais			
-	-	-	-
Resultados dos Ensaios In-Situ			
-	-	-	-

Fig. 7 – Representação esquemática do PDT de uma sondagem (adaptada de El Sibaii et al. (2022) e Universidade do Minho (2021)).

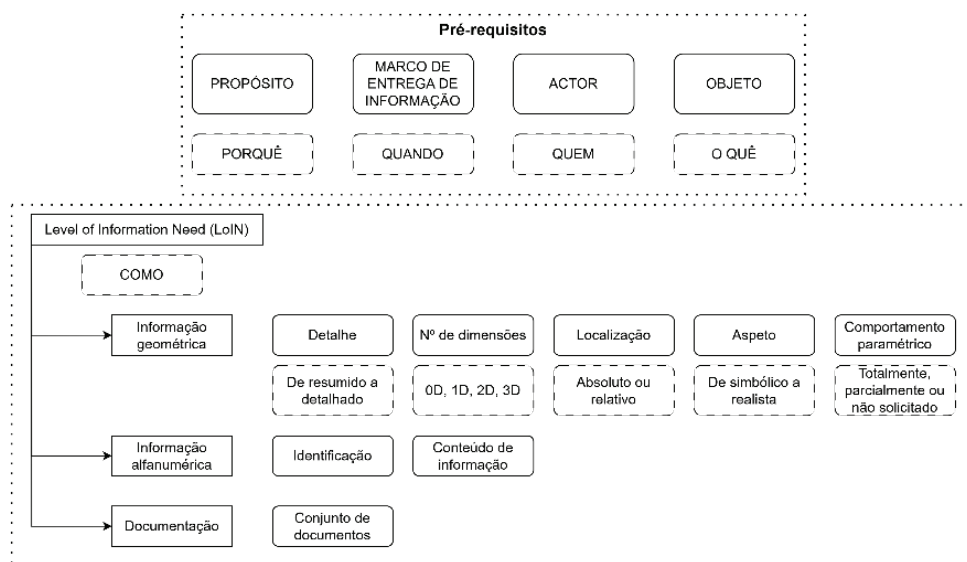


Fig. 8 – Diagrama das relações referentes ao LoIN (adaptado), segundo NP EN ISO 7817-1 (2024).

De realçar que os documentos exemplificativos de um EIR, elaborados por Granja et al. (2024a) e Granja et al. (2024b), incluem tabelas de LoIN já preenchidas, que servem igualmente como exemplo de utilização.

Embora não venha referido nas normas, é prática comum definir o grau de detalhe dos documentos provenientes da Entidade Adjudicante.

O LOD (*Level of Development*) corresponde à quantidade e ao tipo de informação gráfica e não-gráfica que será armazenada num modelo BIM, consoante a fase do processo BIM. É definido no documento “*Level of Development (LOD) Specification – Part I*” do conjunto de entidades pertencentes ao BIM Forum (2024).

Distinto do LOD, vem o LoD (*Level of Detail*) que especifica qual o grau de detalhe visual com que o elemento a implementar no modelo BIM deve ter, consoante a fase de desenvolvimento da obra.

A Figura 9 apresenta um exemplo dos diferentes níveis de desenvolvimento e detalhe aplicados a um elemento a utilizar no modelo BIM. O modelo deve incluir não só detalhes gráficos, mas atributos, propriedades, dados e informações técnicas necessárias e suficientes para ser usado com o propósito pretendido.

No que concerne à entrega da informação, com base na norma NP EN ISO 19650-2 (2025) que implementa os princípios relativos à entrega de informação ao longo das várias fases do ciclo de vida de um ativo, destaca-se o desenvolvimento da *Information Delivery Specification* (IDS). Este ficheiro, criado pela buildingSMART (2024b), contém um conjunto de especificações que os autores dos modelos BIM podem utilizar para validar se o mesmo cumpre todas as especificações requeridas de forma automática. Este vem no formato “.ids” em linguagem compreensível por humanos e interpretável por máquinas.

Da parte da Entidade Adjudicatária, é boa prática elaborar um Plano de Execução BIM (*BIM Execution Plan – BEP*). Para além da CEN/TR 17654 (2021), o *BIM Project Execution Planning Guide – version 2.2*, de Messner et al. (2019), é um recurso útil para o desenvolvimento de um BEP. Adicionalmente, a especificação técnica DNP TS 4585 (2020) disponibiliza um enquadramento para a elaboração do BEP em português, adaptado às fases pré-contratual e pós-contratual.



Fig. 9 – Exemplo de diferentes níveis de desenvolvimento e detalhe no modelo BIM (adaptado de Mcphee (2013) e de BIM Forum (2024)).

O ecossistema BIM integra um sistema de classificação hierárquica, com diferentes níveis de detalhe, associado a códigos alfanuméricos e com terminologia própria. A sua implementação facilita a comunicação e a colaboração em tarefas como medições, estimativas de custos, planeamento e gestão de conflitos em obra. Simultaneamente, apoia práticas da economia circular ao promover a consciencialização relativamente ao uso eficiente de materiais e à minimização de desperdícios. No contexto português, o sistema SECCLasS (*Sustainability Enhanced Construction Classification System*) constitui uma tradução e adaptação do Uniclass 2015 (Lima et al., 2021) (Figura 10).

Código	Tabela	Descrição (PT)	Iditem	Autor
6070 Pr_20_76_71_86	Produtos	Acionamentos de desvios ferroviários suplementares	10881	false
6071 Pr_20_76_71_87	Produtos	Desvios de ferrovia	10882	false
6072 Pr_20_76_71_90	Produtos	Interruptores de armadilha	10883	false
6073 Pr_20_76_71_91	Produtos	Desvios de ferrovia	10884	false
6074 Pr_20_76_78	Produtos	Produtos de estrutura de eixo	10885	false
6075 Pr_20_76_78_12	Produtos	Anéis de caixão de betão	10886	false
6076 Pr_20_76_78_14	Produtos	Lajes de cobertura de poço de betão	10887	false
6077 Pr_20_76_78_16	Produtos	Lajes de aterragem de poço de betão	10888	false
6078 Pr_20_76_78_65	Produtos	Unidades de eixo de betão pré-moldado	10889	false
6079 Pr_20_76_88	Produtos	Seções de madeira	10890	false
6080 Pr_20_76_88_14	Produtos	Cleft chestnut pales	10891	false
6081 Pr_20_76_88_32	Produtos	Tampo de madeira dura e trilhos de contra-esgrima	10892	false
6082 Pr_20_76_88_33	Produtos	Acionamentos de modelos para escape a brechas	10893	false

Fig. 10 – Plataforma de pesquisa de termos SECCLasS (2021).

3.3.4 – Planeamento, medição de quantidades e estimativa orçamental

Uma das vantagens mais evidentes da utilização do BIM é a sua aplicação ao planeamento, à medição de quantidades e, consequentemente, à elaboração de estimativas orçamentais. No domínio da geotecnia, a incerteza está sempre presente e a necessidade de se realizarem ajustes durante a execução da obra é quase inevitável, de forma a responder às condições efetivamente encontradas. Neste sentido, torna-se interessante desenvolver ferramentas que permitam otimizar processos e

mitigar erros em tarefas que são simultaneamente repetitivas e sujeitas a constantes alterações, como aquelas apresentadas.

Sentosa et al. (2023) apresentam um caso de estudo de uma barragem de aterro cujo modelo BIM foi utilizado para extrair quantidades e simular cenários da fase de construção, evidenciando possíveis dinâmicas do plano de trabalhos. A modelação da barragem teve em consideração estes propósitos BIM, sendo composta por objetos que podiam ser constituídos por um único elemento ou um conjunto de elementos agrupados, e que continham informação geométrica, de projeto, de localização e quantidades, facilitando a sua exportação para simulação e análise.

Este estudo demonstrou que uma abordagem baseada em BIM, juntamente com a construção do modelo que inclua toda a sequência construtiva e o plano de trabalhos pode conduzir a uma melhoria na coordenação e concretização das atividades em obra, ao detetar erros de planeamento, fornecer uma representação fiável dos dados que sustente a exploração de alternativas e a tomada de decisão, enquanto serve de base para o acompanhamento das fases de construção e assegura entregas atempadas.

O aparecimento do BIM também teve impacto no trabalho desenvolvido pelos medidores orçamentistas. Num estudo de Nigam et al. (2016), concluiu-se que a metodologia BIM permite a integração da estimativa de custos ao longo de todo o ciclo de vida do projeto, possibilitando atualizações em tempo real, garantindo a consistência nas medições, reduzindo erros como duplicação ou omissão de quantidades e reduzindo o tempo despendido na sua determinação. Dado que, nesta metodologia, as medições podem ser geradas automaticamente, os resultados, nomeadamente as quantidades e, consequentemente, as estimativas de custos, tornam-se mais precisos quanto maior for o nível de detalhe do modelo, o qual é ajustado consoante a fase do projeto ou da obra.

3.4 – Gestão da informação e processamento de dados

3.4.1 – Recolha, organização e armazenamento de dados

Durante o ciclo de vida de uma barragem de aterro são produzidos dados que constituem um registo histórico fundamental para compreender, analisar e prever o comportamento de uma barragem.

Tradicionalmente, a recolha e o registo de dados realizam-se através de redes locais (via *wi-fi*, *bluetooth* ou cabo) ou da transferência manual de dados guardados em *dataloggers* instalados nos postos de observação e controlo. Apesar das vantagens relacionadas com a simplicidade de instalação e o baixo custo inicial, estes métodos estão mais sujeitos a erro humano e dificultam a integração e análise de dados em grande escala.

Paralelamente, esta informação apresenta-se geralmente em formatos como papel, em PDF, em folhas de cálculo, em bases de dados locais ou em formatos específicos provenientes de sensores, comprometendo a sua partilha, armazenamento e processamento, uma vez que parte desses dados pode ser perdida ou ficar indisponível devido a incompatibilidades informáticas.

Atualmente, o uso de sensores IoT e outras tecnologias de monitorização remota (como o varrimento a laser, de acordo com Scaioni et al. (2018) ou Ramos-Alcázar et al. (2017)) permite mitigar alguns dos desafios existentes, simplificando a recolha de dados ao possibilitar a transmissão de informações e comandos em tempo real, de forma remota e com reduzida necessidade de intervenção humana. Estas condições traduzem-se numa maior frequência de leituras, ampliando o volume de dados já considerável, implicando o desenvolvimento de soluções e ferramentas capazes de organizar e armazenar tão elevado volume de dados, e com proveniências e períodos temporais tão distintos: medições contínuas, resultados da prospeção geológico-geotécnica, dos ensaios de caracterização e de compactação dos materiais, registos de inspeções visuais e informação técnico-operacional gerada durante as fases de projeto e construção.

Os custos elevados e a ausência de condições adequadas nas infraestruturas existentes, nomeadamente no que respeita à segurança necessária para proteger os equipamentos contra danos ou roubo, constituem entraves à disseminação destas tecnologias nas barragens.

Importa ainda referir que o Regulamento de Segurança de Barragens impõe a realização de visitas de inspeção visuais periódicas à barragem (Comissão dos Regulamentos de Barragens, 2019), por isso, apesar dos avanços tecnológicos, a introdução manual de observações registadas durante as visitas será sempre um requisito, quer seja pelo preenchimento de formulários em papel ou utilizando aplicações digitais, como o ArcGIS Survey123.

Com base no que foi referido, nas barragens de aterro, o tipo de dados recolhidos pode ser agrupado em dois grupos: dados métricos e dados semânticos.

Os dados métricos correspondem a valores brutos, números ou medições, como por exemplo o nível de água da albufeira (em metros). Os dados semânticos são “valores” com significado dentro de um determinado contexto, e podem ser extraídos, por exemplo, do modelo BIM. Estes dados têm propriedades ou atributos associados, como tipo de material do núcleo da barragem ou a localização de um dispositivo de observação, ou ainda de observações registadas durante as inspeções visuais, como a identificação de zonas de erosão, ressurgências, etc.

O armazenamento de dados métricos “estruturados” ou “estáticos”, como é o caso de leituras de monitorização de sensores, é frequentemente feito em bases de dados relacionais, pois este tipo de base de dados é composto por tabelas inter-relacionadas com esquemas fixos e pré-definidos, que permite facilmente a adição/atualização de novos dados e suporta um grande volume de dados (crescimento vertical) (Gosain, 2021).

Contudo, de acordo com Dadjoo e Kheirkhah (2015), não é possível extrair conhecimento que não esteja explícito nas bases de dados relacionais. Por outro lado, esse tipo de inferência é viável quando se utilizam bases de grafos, compostas por nós e arestas conectados entre si, que representam os dados semânticos e as suas relações. Este tipo de bases de dados permite o raciocínio lógico e a geração e extração de conhecimento com base em estruturas de informação e regras definidas. Com uma representação visual intuitiva, estas bases de conhecimento (semelhantes às redes neuronais) apresentam um desenho de esquema escalável, permitindo adicionar novas relações sem afetar a base de dados existente. A vantagem da utilização deste tipo de base de dados no contexto das barragens de aterro irá ser discutida no capítulo seguinte (capítulo 3.4.2).

Embora não tenham sido encontradas publicações que refiram o uso complementar de bases de dados relacionais com bases de dados de grafos no contexto das barragens de aterro, Baudrit et al. (2022) desenvolveram uma abordagem para converter os dados de bases de dados relacionais em bases de grafos, reconhecendo a vantagem de não só armazenar grandes volumes de dados de forma estruturada, como também explorar relações complexas entre esses dados. Esta organização integrada cria condições para a aplicação eficiente de técnicas de análise avançada, como o *machine learning* (Alocén et al. (2022), Mata et al. (2021) e Mwanza et al. (2024)) ou a mineração de dados (Heleno (2021) e Pan e Zhang (2021)). Contudo, há que ter em conta que a fiabilidade e a precisão dos modelos obtidos dependem da disponibilidade de grandes volumes de dados, de qualidade adequada, o que pode configurar uma limitação significativa na aplicação destas tecnologias a barragens, dado que a recolha de dados neste contexto continua a ser difícil e onerosa (Hariri-Ardebili et al., 2023).

3.4.2 – Ontologias e interoperabilidade semântica

A criação de ontologias constitui um passo fundamental para a representação do conhecimento, permitindo organizar e gerir de forma eficiente esse conhecimento, através da definição de entidades ou conceitos e das relações entre eles, dentro de um domínio específico (Arp et al., 2015). Ou seja, trata-se de uma base de conhecimento estruturada de forma hierárquica, recorrendo inclusive a taxonomias, que permite realizar inferências e apoiar o raciocínio lógico (Hastings, 2021).

A sua utilização diminui a ambiguidade na definição de conceitos (Debellis, 2021) e reforça a interoperabilidade semântica, tornando a informação estruturada legível por máquinas.

O World Wide Web Consortium (W3C) é uma organização internacional que se dedica a desenvolver normas para a *web* e é a entidade de referência no que concerne ao desenvolvimento da *web* semântica. O conceito de *web* semântica foi criado por Berners-Lee et al. (2001) e consiste numa rede de dados, estruturada de forma a permitir a partilha desses dados através de diferentes aplicações, empresas ou sistemas, podendo ser processados de forma automática por ferramentas ou de forma manual.

As ontologias pertencem ao que se designa como *technological stack* da *web* semântica do W3C (Figura 11). O *technological stack* é apresentado como uma arquitetura em camadas que descreve como a informação na *web* pode ser representada, interligada e processada de uma forma “inteligente”, ou seja, com capacidade de raciocínio automático sobre dados interligados, apoiando assim o desenvolvimento da *web* semântica (W3C (2025) e W3C (2001)).

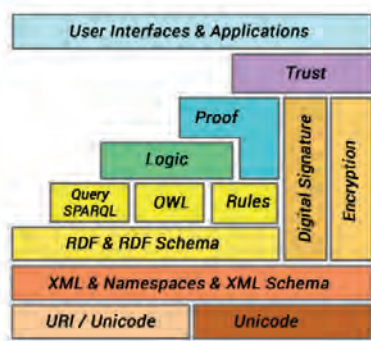


Fig. 11 – *Technology stack* da *web* semântica (Gezer e Bergweiler, 2016).

A linguagem mais comum para a criação de ontologias é a *Web Ontology Language* (OWL) criada pelo W3C e permite que estas possam ser compreendidas por programas informáticos, publicadas na *World Wide Web* e referir ou ser referidas por outras ontologias OWL. Esta linguagem é baseada no *Resource Description Framework* (RDF), que assume a forma dos chamados *triples* – sujeito, predicado e objeto, que imitam a linguagem humana. O esquema RDF (RDFS) atribui significado semântico aos dados em RDF, fornecendo uma estrutura hierárquica e disponibilizando vocabulário básico para a definição de classes (entidades), propriedades (objetos) e relações. O conhecimento pode ser inferido com base em regras lógicas previamente definidas pelos utilizadores, através da *Semantic Web Rule Language* (SWRL) (raciocínio). Por fim, os *triples* podem ser consultados em SPARQL (*Simple Protocol and RDF Query Language*). Estas consultas são concebidas para responder a perguntas de competência que validam a exatidão da ontologia.

Conforme referido no capítulo 3.4.1, um dos tipos de dados utilizados nas barragens de aterro são os dados semânticos. As ontologias permitem estruturar esses dados e transformá-los em conhecimento interrogável e validável por máquinas através de regras definidas *a priori*, potenciando a interoperabilidade entre sistemas pela definição de uma linguagem universal referente a um domínio específico.

Porém, a análise do estado da arte sobre este tema revela que não foram desenvolvidas ontologias dedicadas a barragens de aterro, sendo necessário adaptar ontologias existentes para este domínio.

Essa é uma das grandes vantagens do uso de ontologias: a possibilidade de reutilização entre diferentes domínios, formando um sistema escalável, alinhando-se com a visão de Berners-Lee et al. (2001). Ontologias existentes, como a *Semantic Sensor Network Ontology* e a *Sensor, Observation, Sample and Actuator Ontology* (SSN/SOSA) (Haller et al., 2020), a *Building Topology*

Ontology (BOT) (Rasmussen et al., 2021) e a *Smart Application REference Ontology* (SAREF) (Daniele et al., 2020) e a sua extensão para a água (SAREF4WATR) (Garcia-Castro, 2024.), têm sido aplicadas em contextos de infraestruturas inteligentes (Antunes et al. (2024), Antunes (2024), Zhou et al. (2023), Schuler et al. (2025) e García-Castro et al. (2023)).

Destacam-se os autores Zhou et al. (2023) que desenvolveram uma ontologia para sistemas de monitorização de barragens de betão (OntoDSMS) que interliga informação BIM, sensores e bases de dados, com base nas ontologias SOSA e SSN. As Figuras 12 e 13 apresentam as classes e propriedades estabelecidas para a OntoDSMS.

Não obstante, continua a existir uma carência de ontologias que abranjam as zonas estruturais das barragens de aterro, os diferentes tipos de barragens, parâmetros geológico-geotécnicos, materiais e outros domínios relevantes, essenciais para a gestão e avaliação da segurança destas estruturas.

Para aumentar a interoperabilidade entre sistemas e plataformas, após a criação das ontologias, torna-se necessário mapear os respetivos termos com o esquema IFC. Por exemplo, um “Sensor” corresponderia ao “*IfcSensor*” no esquema IFC. Contudo, o esquema IFC 4.3, atualmente em vigor, não contempla muitos dos conceitos específicos das barragens de aterro. Assim, enquanto não forem introduzidos esses conceitos, será necessário recorrer a termos de carácter provisório e genérico, como “*IfcBuildingElementProxy*” com um “*Predefined Type – Userdefined*” (Serra et al., 2024).

Os autores Wu et al. (2021) apresentam algumas propostas de entidades IFC no domínio da geotecnia.

No domínio das infraestruturas rodoviárias, Ait-Lamallam et al. (2021a), Ait-Lamallam et al. (2021b) apresentam casos de estudo de sucesso de implementação da metodologia BIM, recorrendo a uma abordagem suportada na ontologia IFCInfra4OM por si desenvolvida, aplicada às fases de operação e manutenção.

Perspetiva Estrutural	
Classe	Descrição
LeftBankDam	A parte da barragem que se encontra do lado esquerdo quando olhamos no sentido do fluxo do rio.
RightBankDam	A parte da barragem que se encontra do lado direito quando olhamos no sentido do fluxo do rio.
DrainGate	A parte da barragem utilizada para drenar água.
CrossSection	Secções de uma barragem.
Element	A metaunidade de um componente, p.e. pilares, paredes, secções da barragem.
Material	O tipo de material de um componente, p.e. diferentes classes do betão armado.
Perspetiva da monitorização da segurança	
EnvironmentQuantity	Monitorização do nível de água a montante, temperatura, etc.
Transformation	Monitorização do magnitude, distribuição e evolução da deformação da barragem.
Seepage	Monitorização da percolação no corpo e na fundação da barragem.
StressStrainAndTemperature	Monitorização das tensões internas e alterações de temperatura.
SensorType	Tipo de sensor.
System	Uma unidade abstrata para peças da infraestrutura.
Platform	Uma entidade que alberga outras entidades, nomeadamente sensores.
Sensor	Uma subclasse de um <i>System</i> , mas também uma superclasse de um conjunto específico de dispositivos de monitorização.
Observation	Um conjunto de observações.
ObservableProperty	Um conjunto de propriedades observáveis. Incluindo deslocamentos relativos, absolutos e cumulativos, nível da água, abertura de fendas, caudais, deformação, temperatura, etc.
Abnormal	Um conjunto de sensores cujo estado operacional é anómalo.

Fig. 12 – Classes da ontologia OntoDSMS de acordo com uma perspetiva estrutural e uma perspetiva da monitorização da segurança, adaptado de Zhou et al. (2023).

Tipo	Propriedade	Domínio	Contradomínio/Intervalo
ObjectProperty	hasSection	LeftBankDam	CrossSection
		RightBankDam	
		DrainGate	
	isSectionOf	CrossSection	LeftBankDam
			RightBankDam
			DrainGate
	hasElement	LeftBankDam	
		RightBankDam	
		DrainGate	
	isElementOf	Element	LeftBankDam
			RightBankDam
			DrainGate
	hosts	LeftBankDam	
		RightBankDam	
		DrainGate	
	isHostedBy	Sensor	LeftBankDam
			RightBankDam
			DrainGate
DatatypeProperty	observes	Sensor	ObservableProperty
	isObservedBy	Observation	Sensor
	madeObservation	Sensor	Observation
	madeBySensor	Observation	Sensor
	hasType	Sensor	SensorType
	isTypeOf	SensorType	Sensor
	observedProperty	Observation	ObservableProperty
	hasMaterial	Element	Material
	hasResult	Observation	xsd:float
		Observation	xsd:dateTime
		Sensor	xsd:string
	hasManufactures	Element	xsd:string
		Material	
		Sensor	
	hasElevation	Element	xsd:string
		Material	
		Sensor	

Fig. 13 – Propriedades, domínio e contradomínio da ontologia OntoDSMS (Zhou et al., 2023).

3.4.3 – Integração com plataformas digitais e sistemas de monitorização

As aplicações de modelação BIM mais recentes apenas suportam informação alfanumérica nos campos de propriedades dos objetos. Devido ao elevado volume de dados gerados ao longo do ciclo de vida de uma barragem de aterro, incluí-los completamente no modelo BIM poderia originar um ficheiro excessivamente pesado e complexo, comprometendo o desempenho do *software*. Assim, a adequada implementação da metodologia BIM num projeto desta natureza requer a utilização de uma plataforma ou interface na qual seja possível gerir e visualizar a informação relevante que não pode ser diretamente representada no modelo BIM. Esta plataforma funciona como uma ferramenta de observação integrada dos elementos que compõem a estrutura, permitindo identificar padrões e tendências nos conjuntos de dados e evidenciar o estado e o comportamento da barragem.

A Bentley (2023b) disponibiliza uma plataforma para gerir informação relativa à monitorização (iTwin) que inclui uma interface gráfica que facilita a interpretação dos resultados. Esta plataforma permite ainda identificar ocorrências ou situações e associá-las à informação recolhida por sensores ou através de inspeções visuais (Figura 14). Contudo, os formatos de ficheiro da Bentley não são considerados abertos, tornando a interoperabilidade com outros *softwares* muito mais desafiante.

Segundo a linha de orientação da buildingSMART (2024a), é recomendado utilizar plataformas ou ferramentas que privilegiem a exportação e importação em formato IFC. Existem *softwares* gratuitos para visualizar modelos BIM e os seus campos e propriedades nesse formato: Solibri, BIM Vision, usBIM (ACCA) e até o Notepad.



Fig. 14 – Interface do software iTwin da Bentley Bentley (2023a).

Para a análise e visualização de dados de monitorização de forma dinâmica e interativa, é possível recorrer a ferramentas de *business intelligence*, como o PowerBI, que permite criar *dashboards*, gráficos e relatórios a partir de diferentes fontes de dados, como utilizado por Heleno (2021). Com recurso à aplicação IFC Viewer, desenvolvida por GmbH (2025), é possível também integrar o modelo BIM nessas análises.

Alguns autores referem que o processamento de dados e a criação de plataformas para gestão e manipulação de dados de monitorização foram possíveis graças à programação, dando prioridade ao uso de formatos abertos (Ma e Chi, 2016, Zhu et al., 2021, Han et al., 2022).

Um exemplo de um sistema de gestão de dados de barragens é o *Online Dam Information System* (ODIS), desenvolvido pelas empresas Ofiteco e Hochtief-Vicon, que permite a visualização do modelo 3D e da informação recolhida por sensores e inspeções visuais. Adicionalmente, possibilita a análise de dados através de séries temporais, a definição de modelos estatísticos e a criação de sistemas de alerta/emergência em conformidade com o definido nos planos de observação e de emergência (Hochtief-Vicon e Ofiteco, 2013; Hoppe e Fleitz, 2021).

Na Coreia do Sul, Jeon et al. (2009) desenvolveram um sistema para gestão da segurança em barragens designado por KDSMS, que integra dados sobre a barragem e a albufeira, informação hidrológica, informação resultante de inspeções visuais e de monitorização, incluindo monitorização sísmica. Este sistema encontra-se implementado para 30 barragens geridas pela Kwater (*Korea Water Resource Corporation*), empresa pública sul-coreana responsável pela gestão de recursos hídricos.

Em Portugal, destaca-se o GESTBARRAGENS, desenvolvido no LNEC. Embora não esteja diretamente relacionado com o BIM, trata-se de um sistema de gestão de informação integrada para o controlo e segurança de barragens de betão. Este sistema permite a consulta de bases de dados, que vão sendo atualizadas no decorrer das visitas de inspeção visual, bem como a sincronização e atualização automática da informação proveniente dos sistemas de monitorização de algumas das suas barragens (Silva, et al. (2005) e Silva et al. (2006)).

3.5 – Gémeos digitais nas barragens de aterro

3.5.1 – Considerações iniciais

Sendo as barragens de aterro um dos tipos de barragens mais construídos em todo o mundo, segundo o ICOLD (2024), o número de falhas ou acidentes é também um dos mais elevados. Estas situações estão frequentemente associadas a uma inadequada ou insuficiente caracterização geológico-geotécnica da fundação e dos materiais de aterro, a deficiências de projeto e construção,

a falta de manutenção, entre outros fatores; ou seja, estes incidentes são, em grande parte, atribuídos ao erro humano (Laginha (1982) citado em Pimenta (2008)).

Os processos e atividades inerentes ao projeto, construção, primeiro enchimento e operação de uma barragem de aterro são, por natureza, complexos, envolvendo múltiplas entidades que necessitam de comunicar e colaborar entre si. Acresce ainda que, ao longo da vida da barragem de aterro, é gerado um volume significativo de dados que devem ser eficientemente geridos. Incluem-se resultados de sondagens e ensaios, documentação de projeto, alterações introduzidas durante a fase de construção, bem como dados de monitorização e registos das operações de manutenção. Toda esta informação deve ser estruturada e organizada de forma a garantir que, caso seja necessária uma análise, o engenheiro tenha pleno acesso a ela, permitindo-lhe avaliar de forma rigorosa a situação e tomar decisões fundamentadas. Em qualquer fase, sem uma gestão cuidada e correta de toda a informação, entregáveis e tarefas programadas, o sucesso do projeto ou da obra poderá ficar comprometido, conduzindo a potenciais atrasos, derrapagens de custos, prolongamento dos prazos e a dispositivos ou equipamentos inoperacionais ou danificados.

Um exemplo prático da utilização de um gémeo digital durante a fase de construção é o trabalho apresentado por Ma e Chi (2016), no qual foram descritas várias tecnologias orientadas para a segurança na construção de barragens de aterro. A monitorização, em tempo real, da qualidade da compactação do aterro do núcleo, conforme esquematizado na Figura 15, permitiu intervir na obra num curto espaço de tempo, corrigindo e/ou adaptando os parâmetros de compactação ou removendo camadas deficientemente compactadas, reduzindo os períodos de interrupção e aumentando a qualidade da construção.

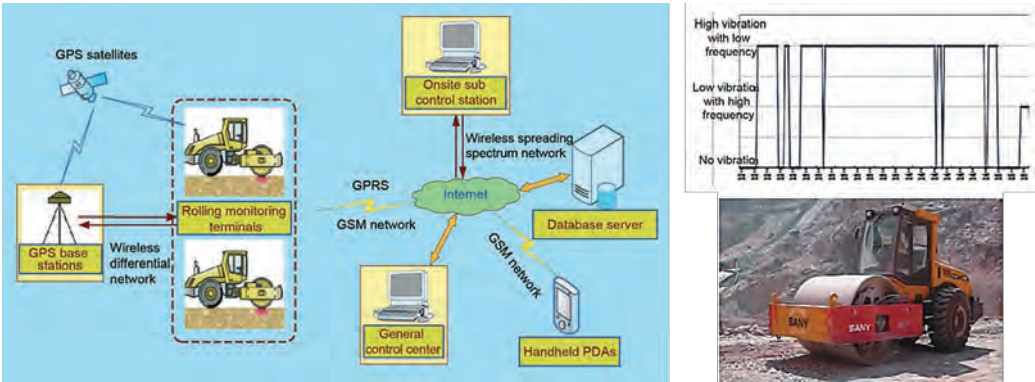


Fig. 15 – Esquema de monitorização, em tempo real, da compactação do núcleo da barragem de Nuozhadu, adaptado de Ma e Chi (2016).

Assim, a criação de gémeos digitais de barragens de aterro, aliada à metodologia BIM, apresenta-se como uma solução que não só possibilita a realização de todas estas atividades de uma forma holística, como também potencia a gestão de informação, a comunicação entre entidades e a otimização contínua dos processos ao longo de todo o ciclo de vida da obra.

Embora existam muitos exemplos de sucesso da aplicação do BIM e dos gémeos digitais em edifícios (Nguyen e Adhikari, 2023), as publicações relativas a barragens são ainda escassas, sendo mais frequentes no caso das barragens de betão (Liu et al., 2021; Marques, 2015; Park e You, 2023; Serra, 2022; Wangchuk et al., 2024; Liu e Luo, 2023; Fernandes, 2015) e muito limitadas no que respeita às barragens de aterro (Heleno, 2021; Seyed-Kolbadi et al., 2020; Mwanza et al., 2024).

É importante ressaltar que, no caso das barragens, a configuração de um gémeo digital não vem necessariamente associada a uma resposta automática na entidade física em tempo real, mas, por exemplo, através de um sistema de notificações, gerar uma resposta ou ação nessa entidade. A sua automatização não poderá ser total, uma vez que são estruturas bastante complexas, em que a

possibilidade de erros e as consequências associadas tornam imperativo que exista uma intervenção humana ao longo do processo e principalmente na decisão final – um conceito também conhecido como *human-in-the-loop* (Meng, 2023).

3.5.2 – Previsão e simulação de comportamentos

A previsão do comportamento de uma barragem de aterro, designadamente no que se refere às tensões e às deformações e à percolação recorre, habitualmente, a *softwares* proprietários como o Plaxis da Bentley, ou o Sigma/W, o Seep/W e o Slope/W da Seequent. Essa análise é tradicionalmente feita em modelos bidimensionais, o que levanta um desafio na forma como se deverão modelar tridimensionalmente as barragens de aterro, incluindo não só a superestrutura, mas também os terrenos de fundação.

Geralmente, estas análises recorrem ao método dos elementos finitos (MEF), que desempenha um papel muito importante na verificação da integridade estrutural da barragem. Na fase de projeto, o MEF permite definir a solução e determinar os critérios de alerta/emergência. Nas fases de construção, primeiro-enchimento e operação, é geralmente necessário atualizar esses modelos devido a alterações no projeto, sendo cruciais para as tomadas de decisão.

No entanto, os habituais *softwares* geotécnicos para análise numérica não atingiram ainda a interoperabilidade necessária com os *softwares* de modelação e visualização BIM. A integração BIM-para-MEF é já uma funcionalidade nativa para *softwares* de análise estrutural de edifícios, como o Robot e o Tekla, importando geometria e dados semânticos, mas tal não se verifica para as barragens de aterro, cuja modelação é significativamente mais complexa.

Satyanaga et al. (2023) resumem alguns dos métodos utilizados por diversos autores para ultrapassar este desafio.

Utilizando *software* proprietário, Fabozzi et al. (2021) apresentaram um caso de estudo de dois túneis de metro em Nápoles, onde é possível visualizar os dados geológico-geotécnicos, a estrutura do túnel e o processo de escavação, no modelo digital 3D. Para o efeito, recorreram a um pacote da Bentley de 2021 que continha o seguinte *software*: OpenRail Designer 2021 (versão 10.10.21.04), o hINT Professional 2021, o SynchroPro 2021 e o Plaxis 3D. Concluíram que, embora a importação de informação geométrica pudesse ser feita de forma automática utilizando ficheiros .dwg, .ifc ou nuvens de pontos, existirá sempre a necessidade de efetuar operações de forma manual para a definição completa do modelo numérico.

Giangiulio et al. (2023) desenvolveram uma metodologia alternativa recorrendo à criação de interfaces de programação de aplicações (APIs) para converter o modelo BIM de uma barragem de aterro e a fundação no seu correspondente modelo numérico, exportando os resultados de volta para o modelo BIM (Figura 16). Esta abordagem, que constitui uma evolução do método de Tschuchnigg e Lederhilger (2020), recorre a uma interface Python para gerir o fluxo bidirecional de dados entre o modelo BIM, através do *software* ProVI (uma aplicação utilizada para o dimensionamento de infraestruturas rodoviárias em 3D) e o modelo numérico, através do Plaxis 2D da Bentley. Esta interface permite recolher dados de fontes externas (como o faseamento construtivo, relatórios de sondagem e de ensaios laboratoriais, etc.) integrando-os no modelo numérico, permitindo a análise de tensões e de deformações da estrutura de uma forma mais automatizada. O seu algoritmo permite também otimizar a qualidade da malha de elementos finitos refinando automaticamente as áreas com maior gradiente tensão-deformação. Recorrendo a uma abordagem discreta no tempo, obtiveram-se os assentamentos para vários perfis transversais da barragem num determinado intervalo de tempo. O conjunto de resultados obtidos para cada ponto deu origem a uma nuvem de pontos, que constitui a representação tridimensional dos assentamentos da barragem ao longo do tempo.

Esta abordagem foi utilizada de forma semelhante por Alsahly et al. (2020), que aplicaram um conceito desenvolvido por Dadvand et al. (2010) na Universidade de Ruhr, em Bochum, designado por EKate (Enhanced Kratos for Advanced Tunnelling Engineering), para desenvolver um TIM-*Tunnel Information Model*, desenvolvido especificamente para projetos de escavação de túneis,

permitindo extrair automaticamente informação relevante como a geologia, alinhamentos, recobrimentos, materiais e parâmetros de processo, para utilização em tecnologias de análise numérica baseadas no MEF. A informação extraída é armazenada em ficheiros de formato .txt, que são lidos por um algoritmo desenvolvido em Python, que executa a análise numérica. Embora não especifique em que formato os resultados obtidos são armazenados, os autores referem que os mesmos são incorporados automaticamente no TIM, ao qual o acesso é contínuo e permanente.

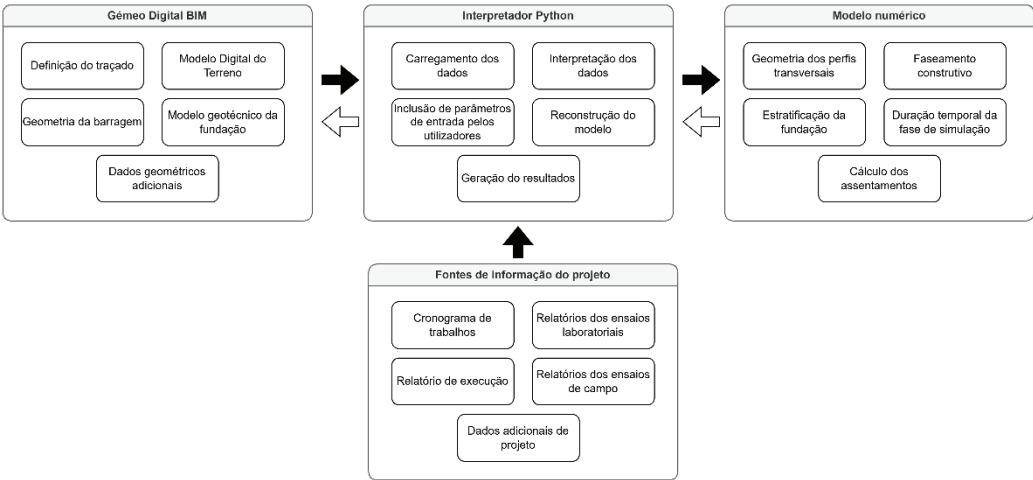


Fig. 16 – Metodologia de processamento de dados, adaptado de Giangliulo et al. (2023).

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

As vantagens e desvantagens associadas à integração da metodologia BIM com gémeos digitais têm sido amplamente discutidas ao longo dos últimos anos. Os benefícios da sua adoção são evidentes e o futuro da engenharia civil passará, necessariamente, pelo seu amadurecimento. No entanto, permanece um elevado potencial de desenvolvimento relativamente à associação do BIM com novas tecnologias de digitalização, integração com redes de dispositivos e sensores, bem como soluções de *software* e outras ferramentas com ligação em rede destinadas à recolha e partilha de dados entre projetos e bases de dados. Simultaneamente, observa-se uma crescente relevância do conceito OpenBIM e da interoperabilidade entre diferentes sistemas, que contribuem para reduzir riscos tecnológicos e expandir domínios de aplicação do BIM a infraestruturas como estradas, ferrovias, pontes e, mais recentemente, túneis. No contexto das barragens, a implementação do BIM encontra-se ainda numa fase inicial, com apresentação de casos de estudo sobretudo em barragens de betão e muito poucos em barragens de aterro.

Embora muitas vezes sejam vistos como modelos tridimensionais, os modelos BIM são na realidade modelos de informação muito mais abrangentes, que integram dados geométricos, técnicos, temporais, económicos e operacionais. Esta metodologia oferece, assim, um grande potencial para melhorar e otimizar os fluxos de trabalho em todo o ciclo de vida de uma barragem de aterro integrando várias especialidades num modelo unificado, antecipando potenciais conflitos e mitigando erros e incompatibilidades durante a fase de construção. As tendências futuras incluem o uso de modelos tridimensionais para uma melhor compreensão de geometrias complexas, simulações 4D para o planeamento do faseamento construtivo otimizando recursos, e a geração de mapas de quantidades mais precisos contribuindo para se obter estimativas orçamentais mais rigorosas (5D). Aliado a isto, o desenvolvimento de plataformas para a visualização de dados de

monitorização em tempo real, em conjunto com a integração de gémeos digitais BIM, contribuem para uma gestão mais eficiente da informação em todo o ciclo de vida da barragem, com especial relevância nas fases de exploração e manutenção, constituindo ferramentas essenciais para a realização das avaliações estruturais.

O aparecimento de *triplets* digitais (trigémeos digitais) contribui adicionalmente para a realização de modelação preditiva avançada, ao incorporar *machine learning* e *business intelligence*, permitindo tomadas de decisão mais proactivas ao longo de todo o ciclo de vida do ativo (Singh et al., 2021).

No entanto, a aplicação generalizada do BIM e dos gémeos digitais em barragens de aterro é ainda bastante incipiente, com um número reduzido de publicações e casos de estudo de sucesso em revistas indexadas e mesmo em artigos de conferência. Entre os principais desafios incluem-se a falta de maturidade e de investimento em formação e investigação, a falta de normalização e documentos com exemplos de boas práticas, e outras lacunas como, a existência de uma linguagem universal específica para barragem de aterro e uma biblioteca de dados contendo a definição inequívoca de conceitos relacionados com barragens de aterro e que possa ser referenciada em especificações IDS e modelos IFC. Estes termos devem constar de modelos de dados de produtos (PDTs) relacionados com barragens de aterro.

A falta de interoperabilidade entre o modelo BIM em .ifc e as ferramentas geotécnicas de análise numérica (como o Plaxis ou as ferramentas da Seequent) constitui um entrave à disseminação da metodologia BIM para os gémeos digitais, que tem como um dos grandes objetivos contribuir para a gestão e análise da segurança.

Ainda existe uma escassez de plataformas *open-source* que sejam capazes de hospedar modelos BIM e permitam o armazenamento e consultas de bases de dados, com a possibilidade de notificações em tempo real sempre que um critério de alerta seja atingido.

Apesar da metodologia BIM e dos gémeos digitais terem um impacto positivo no projeto e construção de novas barragens, o parque de barragens existentes também é digno de atualização. Neste sentido, é crucial desenvolver ferramentas que permitam importar e digitalizar dados antigos, muitas vezes disponíveis apenas em papel ou em ficheiros Excel ou PDF, como era predominante no passado. Para tal, pode recorrer-se a tecnologias de OCR (*Optical Character Recognition*), que convertem automaticamente texto impresso ou digitalizado em informação editável e estruturada. Porém, estas ferramentas ainda carecem de grande desenvolvimento, não só para garantir uma conversão realmente precisa, mas também porque cada documento apresenta características e formatos distintos, o que dificulta a existência de uma solução única capaz de lidar eficazmente com todos os casos.

5 – AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE), com a referência UID/04029/Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE), e no âmbito do Laboratório Associado Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE com a referência LA/P/0112/2020.

Este trabalho é financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia, ao abrigo do contrato da bolsa [2024.05521.BDANA] atribuída ao primeiro autor.

Este trabalho beneficiou igualmente da colaboração do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), cujo conhecimento técnico e apoio institucional foram valiosos para o avanço desta investigação.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aish, R. (1986). *Building modelling the key to integrated construction CAD*. 5th International Symposium on the Use of Computers For Environmental Engineering related to Buildings, pp. 55–67, Bath.
- Ait-Lamallam, S.; Sebari, I.; Yaagoubi, R.; Doukari, O. (2021a). *IFCInfra4OM: An Ontology to Integrate Operation and Maintenance Information in Highway Information Modelling*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10 (5), p. 305. <https://doi.org/10.3390/ijgi10050305>
- Ait-Lamallam, S.; Yaagoubi, R.; Sebari, I.; Doukari, O. (2021b). *Extending the IFC Standard to Enable Road Operation and Maintenance Management through OpenBIM*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10 (8), p. 496. <https://doi.org/10.3390/ijgi10080496>
- Ali, K. N.; Alhajlah, H. H.; Kassem, M. A. (2022). *Collaboration and Risk in Building Information Modelling (BIM): A Systematic Literature Review*. Buildings, 12 (5), p. 571, Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/buildings12050571>
- Alocén, P.; Fernández-Centeno, M. Á.; Toledo, M. Á. (2022). *Prediction of Concrete Dam Deformation through the Combination of Machine Learning Models*. Water, 14 (1133), pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/w14071133>
- Alsahly, A.; Hegemann, F.; König, M.; Meschke, G. (2020). *Integrated BIM-to-FEM approach in mechanised tunnelling*. Geomechanics and Tunnelling, 13 (2), pp. 212–220. <https://doi.org/10.1002/geot.202000002>
- Antunes, A. (2024). *Application of semantic web techniques in data warehouse and business intelligence systems*, PhD. Thesis, ISCTE, Lisboa.
- Antunes, A.; Barateiro, J.; Marecos, V.; Petrović, J.; Cardoso, E. (2024). *Ontology-based BIM-AMS integration in European Highways*. Intelligent Systems with Applications, 22p. 200366. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2024.200366>
- Arp, R.; Smith, B.; Spear, A. D. (2015). *Building Ontologies with Basic Formal Ontology*, The MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/9780262527811.001.0001>
- Azenha, M.; Lino, J. C.; Caires, B. (2023). *20ª Edição do Curso BIM: Capítulo 1 - Introdução ao BIM*.
- Azenha, M.; Sibaii, M. E. (2024). *Passaportes Digitais dos Produtos e a iniciativa pdts.pt*. Workshop 5ª Edição do ptBIM 2024, Lisboa.
- Baudrit, C.; Taillandier, F.; Curt, C.; Hoang, Q. A.; Sbartaï, Z.-M.; Breysse, D. (2022). *Graph based knowledge models for capitalizing, predicting and learning: A proof of concept applied to the dam systems*. Advanced Engineering Informatics, 52p. 101551. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101551>
- Bentley. (2023a). *iTwin Capture*. <https://br.bentley.com/software/itwin-capture/>.
- Bentley. (2023b). *Dam Monitoring*. <https://www.bentley.com/solutions/dam-monitoring/>.
- Berners-Lee, T.; Hendler, J.; Lassila, O. (2001). *The Semantic Web: A New Form of Web Content That is Meaningful to Computers Will Unleash a Revolution of New Possibilities*. ScientificAmerican.com.
- BIM Forum (2024). *Level of Development - LOD specification - Part I*. <https://bimforum.org/wp-content/uploads/2024/11/LOD-Spec-2024-Part-I-official-English.pdf>

- Broo, D. G.; Schooling, J. (2023). *Digital twins in infrastructure: definitions, current practices, challenges and strategies*. International Journal of Construction Management, 23 (7), pp. 1254–1263. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1966980>
- buildingSMART. (2024a). *OpenBIM*. OpenBIM. <https://www.buildingsmart.org/about/openbim/>.
- buildingSMART (2024b). *Information Delivery Specification (IDS)*. <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/information-delivery-specification-ids/>
- buildingSMART Portugal (2022). *BuildingSMART Portugal*. <https://buildingsmart.pt/>.
- CEN/TR 17654 (2021). *Guideline for the implementation of Exchange Information Requirements (EIR) and BIM Execution Plans (BEP) on European level based on EN ISO 19650-1 and -2*, CEN, Brussels, Belgium. https://standards.cencenelec.eu/dyn/www/f?p=CEN:110:0:::FSP_PROJECT,FSP_ORG_ID:68723,1991542&cs=146E981B5A0FD0FD0B3B13B2941732CFC
- Comissão dos Regulamentos de Barragens. (2019). *Regulamento de Segurança de Barragens (RSB)*. Decreto-Lei n.º 21/2018 de 28 de março, 1433–1454 p.
- Cortijo García, A.; De Miguel Sin Monge, M. A.; Rodríguez Gamero, J.; García Alberti, M.; Arcos Álvarez, A. A. (2021). *Aplicación de BIM a la modelización de una presa arco*. Anales de Edificación, 7 (3), pp. 20–25. <https://doi.org/10.20868/ade.2021.4971>
- CT197 (2021). *Regras de modelação de objetos BIM*, SECCLasS - Sustainability Enhanced Construction Classification System. <https://secclass.pt/relatorios/regras-de-modelacao-de-objetos-bim/>
- Dadjoo, M.; Kheirkhah, E. (2015). *An Approach For Transforming of Relational Databases to OWL Ontology*. International journal of Web & Semantic Technology, 6 (1), pp. 19–28. <https://doi.org/10.5121/ijwest.2015.6102>
- Dadvand, P.; Rossi, R.; Oñate, E. (2010). *An Object-oriented Environment for Developing Finite Element Codes for Multi-disciplinary Applications*. Archives of Computational Methods in Engineering, 17 (3), pp. 253–297. <https://doi.org/10.1007/s11831-010-9045-2>
- Daniele, L.; Garcia-Castro, R.; Lefrançois, M.; Poveda-Villalón, M. (2020). *SAREF: the Smart Applications REference ontology*. <https://saref.etsi.org/core/v3.1.1/>
- Debellis, M. (2021). *A Practical Guide to Building OWL Ontologies - Using Protégé 5.5 and Plugins*.
- DNP TS 4585. (2020). *Modelação de Informação da Construção (BIM) - Plano de Execução BIM (BEP) - Especificação da estrutura do documento*, IPQ, Lisboa, Portugal, 20 p.
- Eastman, C. (1975). *The Use of Computers Instead of Drawings in Building Design*. AIA Journal, 63pp. 46–50.
- El Sibaii, M. (2020). *Towards efficient BIM use of underground geotechnical data*, MSc Thesis, Universidade do Minho, Guimarães.
- El Sibaii, M.; Granja, J.; Bidarra, L.; Azenha, M. (2022). *Towards efficient BIM use of geotechnical data from geotechnical investigations*. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 27 (19), pp. 393–415. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.019>
- EN ISO 19650-1 (2018). *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management*

using building information modelling - Part 1: Concepts and principles, CEN, Brussels, Belgium, 42 p.

- EN ISO 19650-2 (2018). *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modelling - Part 2: Delivery phase of the assets*, CEN, Brussels, Belgium.
- Fabozzi, S.; Biancardo, S. A.; Veropalumbo, R.; Bilotta, E. (2021). *I-BIM based approach for geotechnical and numerical modelling of a conventional tunnel excavation*. Tunnelling and Underground Space Technology, 108. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103723>
- Fernandes, L. (2015). *An integrated model for simulation of construction phasing of arch concrete dams*, MSc Thesis, Universidade do Minho, Guimarães.
- Fuller, A.; Fan, Z.; Day, C. (2020). *Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research*. IEEE Access, 8pp. 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- Garcia-Castro, R. (2024). *SAREF4WATR: an extension of SAREF for the water domain*. <https://saref.etsi.org/saref4watr/v2.1.1/>
- García-Castro, R.; Lefrançois, M.; Poveda-Villalón, M.; Daniele, L. (2023). *The ETSI SAREF Ontology for Smart Applications: A Long Path of Development and Evolution*. Energy Smart Appliances, pp. 183–215, John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119899457.ch7>
- Gezer, V.; Bergweiler, S. (2016). *Service and Workflow Engineering based on Semantic Web Technologies*. 10th International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies, vol.10, pp. 152–157, Venice, Italy.
- Giangiulio, M.; Granitzer, A. N.; Tschuchnigg, F.; Hoffmann, J. (2023). *BIM-to-FEM: Development of a Software Tool to Increase the Operational Efficiency of Dam Construction Projects*. Lecture Notes in Civil Engineering (LNCE), vol.306, pp. 182–195, Springer, Guimarães. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20241-4_13
- GmbH, F. (2025). *IFC Viewer*. PowerBI visuals. <https://appsource.microsoft.com/en-us/product/power-bi-visuals/flinkergmbh1644589155747.ifc-viewer>
- Gosain, D. (2021). *A Survey and Comparison of Relational and Non-Relational Database*. International journal of engineering research and technology.
- Granja, J.; Espinho, A.; Mendes, A.; Silva de Oliveira, A.; Pires, C.; Penedo, C.; ... Azenha, M. (2024a). *EIR para a fase de projeto de uma obra pública*, buildingSMART Portugal. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.14576465>
- Granja, J.; Silva de Oliveira, A.; Pinto, D.; Lima, F.; Silva, H.; Rodrigues, I.; ... Azenha, M. (2024b). *EIR para a fase de projeto de uma obra privada*, buildingSMART Portugal. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.14547997>
- Grieves, M. (2014). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication
- Grieves, M.; Vickers, J. (2016). *Origins of the Digital Twin Concept*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>

- Haller, A.; Janowicz, K.; Cox, S.; Le Phuoc, D.; Taylor, M.; Lefrançois, M. (2020). *SSN: Semantic Sensor Network Ontology & SOSA: Sensor, Observation, Sample and Actuator Ontology*. <https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/>
- Han, Z.; Li, Y.; Zhao, Z.; Zhang, B. (2022). *An Online safety monitoring system of hydropower station based on expert system*. *Energy Reports*, 8pp. 1552–1567. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.040>
- Hananto, A. L.; Tirta, A.; Herawan, S. G.; Idris, M.; Soudagar, M. E. M.; Djamari, D. W.; Veza, I. (2024). *Digital Twin and 3D Digital Twin: Concepts, Applications, and Challenges in Industry 4.0 for Digital Twin*. *Computers*, 13 (4), p. 100, Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/computers13040100>
- Hariri-Ardebili, M. A.; Salazar, F.; Pourkamali-Anaraki, F.; Mazzà, G.; Mata, J. (2023). *Soft Computing and Machine Learning in Dam Engineering*. *Water*, 15 (5), pp. 917–925. <https://doi.org/10.3390/w15050917>
- Hasan, H.; Naimi, S.; Hameed, M. M. (2023). *A Comprehensive Analysis of BIM Technology's Critical Role in Assessing Cost for Complex Dam Construction Projects*. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 10 (3). <https://doi.org/10.18280/mmep.100305>
- Hastings, J. (2021). *Formal Representations of Ontologies for Automation of Analyses*, Committee on Accelerating Behavioral Science Through Ontology Development and Use, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. <https://nap.nationalacademies.org/resource/26464/Hastings-comissioned-paper.pdf>
- Heleno, A. F. (2021). *BIM for information management in structural safety control of embankment dams*, MSc Thesis - European Master in Building Information Modelling BIM A+, Universidade do Minho, Guimarães.
- Hendriatiningsih, S.; Widyastuti, R.; Saptari, A. Y.; Harpiandi, A.; Suhandri, H. F.; A. Khalifa, N. (2021). *Harnessing Multi Source Point Cloud Technology to Overcome High Resolution Building Information Modeling of Manganti Dam, Indonesia: A Preliminary Result*. *Jurnal Kejuruteraan*, 33 (4), pp. 943–953. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-33\(4\)-17](https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-33(4)-17)
- Hochtief-Vicon.; Ofiteco. (2013). *BIM solution for dam monitoring services*. pp. 29–31. https://www.ofiteco.com/sites/default/files/2016-11/BIM%20%26%20SHM%20Excerpt%20Newsletter%20Jun13_v0.1.pdf
- Hoppe, S.; Fleitz, J. (2021). *Using BIM for dam safety management*. 4th International Dam World Conference, pp. 189–198, LNEC, Lisboa, Portugal.
- ISO 16739-1 (2024). *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries - Part 1: Data schema*, ISO, Geneva, Switzerland.
- ISO 23387 (em publicação). *Building information modelling (BIM) — Data templates for objects used in the life cycle of assets*, ISO, Geneva, Switzerland.
- Jeon, J.; Lee, J.; Shin, D.; Park, H. (2009). *Development of dam safety management system*. *Advances in Engineering Software*, 40 (8), pp. 554–563. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2008.10.009>
- Koumou, K. O.; Isafiade, O. (2024). *Asset Management Trends in Diverse Settings Involving Immersive Technology: A Systematic Literature Review*. *IEEE Access*, pp. 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3461548>

- Laginha, S. (1982). *Elements for a thorough statistical analysis of dam failures*. Separata da revista da Universidade de Coimbra, XXIXpp. 163–178.
- Lima, R.; Couto, P.; Falcão, M. J.; Salvado, F.; Resende, R.; Parece, S. (2021). *SECCLasS - Análise de conceitos, normas e sistemas de classificação da informação da construção -Relatório de Abril*. p. 72, Lisboa. https://secclass.pt/wp-content/uploads/2021/10/Relatorio_Abril_SECCLasS.pdf
- Liu, R.; Luo, Z. (2023). *Application of digital intelligent construction in the field of water conservancy and hydropower engineering*. Journal of Physics: Conference Series, 2565 (1), p. 012025, IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2565/1/012025>
- Liu, T.; Zhang, S.; Wang, C. (2021). *A BIM-Based Safety Management Framework for Operation and Maintenance in Water Diversion Projects*. Water Resources Management, 35 (5), pp. 1619–1635. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02813-7>
- Lou, J.; Lu, W.; Xue, F. (2020). *A review of BIM data exchange method in BIM collaboration*. Proceedings of the 25th International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate, Wuhan, China.
- Ma, H.; Chi, F. (2016). *Major Technologies for Safe Construction of High Earth-Rockfill Dams*. Engineering, 2 (4), pp. 498–509. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.04.001>
- Marques, A. (2015). *Implementação de metodologias BIM na Direção de Engenharia de Barragens da EDP: Casos de estudo de projeto de estruturas em obras hidráulicas*, MSc Thesis, Universidade do Minho.
- Mata, J.; Salazar, F.; Barateiro, J.; Antunes, A. (2021). *Validation of Machine Learning Models for Structural Dam Behaviour Interpretation and Prediction*. Water, 13 (2717), pp. 1–27. <https://doi.org/10.3390/w13192717>
- McPhee, A. (2013). *practical BIM: What is this thing called LOD*. practical BIM.
- Meng, X.-L. (2023). *Data Science and Engineering With Human in the Loop, Behind the Loop, and Above the Loop*. Harvard Data Science Review, 5 (2). <https://doi.org/10.1162/99608f92.68a012eb>
- Messner, J.; Anumba, C.; Dubler, C.; Goodman, S.; Kasprzak, C.; Kreider, R.; ... Zikic, N. (2019). *BIM Project Execution Planning Guide, Version 2.2*, Computer Integrated Construction Research Program, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA. <https://bim.psu.edu/>
- Mwanza, J.; Mashumba, P.; Telukdarie, A. (2024). *A Framework for Monitoring Stability of Tailings Dams in Realtime Using Digital Twin Simulation and Machine Learning*. Procedia Computer Science, 232, pp. 2279–2288. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.047>
- NATSPEC; MasterSpec (2018). *The OBOS - Open BIM Object Standard - version 1.0*, OBOS Open BIM Object Standard & OBOS Open BIM Object Standard.
- NBS (2023). *NBS BIM Object Standard - version 2.2*, NBS.
- Nguyen, T. D.; Adhikari, S. (2023). *The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction: A Literature Review*. Sustainability (Switzerland), 15 (13). <https://doi.org/10.3390/su151310462>
- Nigam, M.; Dixit, A.; Sachan, K. (2016). *BIM Vs Traditional Quantity Surveying And Its Future Mapping*. IJEDR, pp. 1261–1265.

- NP EN ISO 7817-1 (2024). *Building information modelling - Level of information need - Part 1: Concepts and principles*, IPQ, Lisboa, Portugal, 3 p.
- NP EN ISO 19650-1. (2025). *Organização e digitalização da informação sobre edifícios e obras de engenharia civil, incluindo modelação da informação da construção (BIM) - Gestão da informação utilizando modelação da informação da construção - Parte 1: Conceitos e princípios*, IPQ, Lisboa, Portugal, 44 p.
- NP EN ISO 19650-2 (2025). *Organização e digitalização da informação sobre edifícios e obras de engenharia civil, incluindo modelação da informação da construção (BIM) - Gestão da informação utilizando modelação da informação da construção - Parte 2: Período de desenvolvimento dos ativos*, IPQ, Lisboa, Portugal, 37 p.
- NP EN ISO 23386 (2020). *Building information modelling and other digital processes used in construction - Methodology to describe, author and maintain properties in interconnected data dictionaries*, IPQ, Lisboa, Portugal, 3 p.
- Pan, Y.; Zhang, L. (2021). *A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management*. *Automation in Construction*, 124 (103564), pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103564>
- Park, D.; You, H. (2023). *A Digital Twin Dam and Watershed Management Platform*. *Water*, 15 (11), p. 2106. <https://doi.org/10.3390/w15112106>
- Pimenta, L. (2008). *Abordagens de Riscos em Barragens de Aterro*, Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Ramos-Alcázar, L.; Marchamalo-Sacristán, M.; Martínez-Marín, R. (2017). *Estimating and Plotting TLS Midrange Precisions in Field Conditions: Application to Dam Monitoring*. *International Journal of Civil Engineering*, 15 (2), pp. 299–307. <https://doi.org/10.1007/s40999-016-0093-3>
- Rasmussen, M.; Pauwels, P.; Lefrançois, M.; Schneider. (2021). *BOT: Building Topology Ontology*. <https://w3c-lbd-cg.github.io/bot/>.
- Rosa, A.; Azenha, M.; Carreto, J. (2024). *Recurso a Metodologias BIM em Barragens de Aterro: Práticas Atuais, Possibilidades e Desafios*. 12º Congresso Luso-Brasileiro-8as Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia, LNEC.
- Saback, V.; Popescu, C.; Blanksvärd, T.; Täljsten, B. (2022). *Asset Management of Existing Concrete Bridges Using Digital Twins and BIM: a State-of-the-Art Literature Review*. *Nordic Concrete Research*, 66 (1). <https://doi.org/10.2478/ncr-2021-0020>
- Satyanaga, A.; Aventian, G. D.; Makenova, Y.; Zhakiyeva, A.; Kamaliyeva, Z.; Moon, S.-W.; Kim, J. (2023). *Building Information Modelling for Application in Geotechnical Engineering*. *Infrastructures*, 8 (103), pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8060103>
- Scaioni, M.; Marsella, M.; Crosetto, M.; Tornatore, V.; Wang, J. (2018). *Geodetic and Remote-Sensing Sensors for Dam Deformation Monitoring*. *Sensors*, 18 (11), p. 3682, Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/s18113682>
- Schuler, P.-C.; Mirboland, M.; Stark, Y.; Mohammad, A. A.; Koch, C. (2025). *Linked Data for Structural Diagnostics: A Semantic Framework for Sustainable Infrastructure Management*, Porto, Portugal.
- SECCLasS (2021). *Ferramenta de Pesquisa SECCLasS | SECCLasS*. <https://secclass.pt/search/>.

- Sentosa, G. A.; Azzaqy, A.; Wardani, S. G.; Setyandito, O.; Ambiaro, A. S.; Pierre, A. J.; Farell (2023). *Construction scheduling and monitoring control of dams based on BIM*. The 6th International Conference on Eco Engineering Development 2022 (ICEED 2022), vol.1169, pp. 1–9, IOP Publishing, Institute of Physics. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1169/1/012033>
- Serra, C. (2022). *As potencialidades e desafios da implementação BIM adaptada ao controlo de segurança estrutural de barragens de betão*. 4º Congresso Português de Building Information Modelling, vol.1, pp. 371–382, UMinho Editora, Braga. <https://doi.org/10.21814/uminho.ed.32.31>
- Serra, C.; Silva, J. C.; Granja, J.; Azenha, M. (2024). *BIM no controlo de segurança de barragens de betão: Uma ferramenta de apoio às inspeções visuais*. 5º Congresso Português de Building Information Modelling Volume 1: ptBIM, UMinho Editora. <https://doi.org/10.21814/uminho.ed.142.12>
- Seyed-Kolbadi, S. M.; Hariri-Ardebili, M. A.; Mirtaheri, M.; Pourkamali-Anaraki, F. (2020). *Instrumented Health Monitoring of an Earth Dam*. *Infrastructures*, 5 (3), p. 26. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5030026>
- Shafto, M.; Conroy, M.; Doyle, R.; Glaessgen, E.; Kemp, C.; LeMoigne, J.; Wang, L. (2010). *Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap - Technology Area 11*, NASA.
- Shah, N. (2025). *Leading Countries With BIM Adoption*. United-BIM. <https://www.united-bim.com/leading-countries-with-bim-adoption/>.
- Shishehgarkhaneh, M. B.; Keivani, A.; Moehler, R. C.; Jelodari, N.; Laleh, S. R. (2022). *Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and Digital Twin (DT) in Construction Industry: A Review, Bibliometric, and Network Analysis*. *Buildings*, 12 (10). <https://doi.org/10.3390/buildings12101503>
- Silva, A.; Barateiro, J.; Galhardas, H.; Matos, H. (2006). *Data Analysis Features of the GESTBARRAGENS System*. Second International Conference of Innovative Views of .NET Technologies, Florianópolis, Brazil.
- Silva, A. R.; Galhardas, H.; Portela, E. (2005). *O Sistema de Informação GESTBARRAGENS*. Actas do Seminário: Barragens - Tecnologia, Segurança e Interação com a Sociedade, Comissão Nacional das Grandes Barragens, Lisboa.
- Silva, T. F. L. da.; Vieira, D. R.; de Carvalho, M. M. (2024). *Exploring the challenges in Building Information Modeling (BIM) during the Design Phase: Evidence from cross-country studies*. *IEEE Transactions on Engineering Management*, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1109/TEM.2024.3461508>
- Singh, M.; Fuenmayor, E.; Hinchey, E. P.; Qiao, Y.; Murray, N.; Devine, D. (2021). *Digital Twin: Origin to Future*. *Applied System Innovation*, 4 (2), p. 36, Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>
- Smith, M. (2012). *Embankment dam foundation analysis for the decrease of internal erosion likelihood*. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 6 (4), pp. 431–436. <https://doi.org/10.1007/s11709-012-0183-5>
- Tao, F.; Xiao, B.; Qi, Q.; Cheng, J.; Ji, P. (2022). *Digital twin modeling*. *Journal of Manufacturing Systems*, 64pp. 372–389. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.015>

- Tschuchnigg, F.; Lederhilger, C. (2020). *BIM in Geotechnics - Application to Road and Railway Construction*. Information Technology in Geo-Engineering. ICITG 2019, pp. 471–482, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32029-4_41
- Universidade do Minho. (2021). *PDTs Portugal*. <https://pdt.s.pt/dashboard>
- W3C. (2001). *The Semantic Web made easy*. Metalog - towards the Semantic Web. <https://www.w3.org/RDF/Metalog/docs/sw-easy>
- W3C. (2025). *Semantic Web Standards*. Semantic Web Standards. https://www.w3.org/2001/sw/wiki/Main_Page
- Wahyuningrum, C. A.; Sari, Y. C.; Kresnanto, N. C. (2020). *Building Information Modeling (BIM) for Dams-Literature Review and Future Needs*. Journal of the Civil Engineering Forum, 6 (1). <https://doi.org/10.22146/jcef.51519>
- Wangchuk, J.; Banihashemi, S.; Abbasianjahromi, H.; Antwi-Afari, M. F. (2024). *Building Information Modelling in Hydropower Infrastructures: Design, Engineering and Management Perspectives*. Infrastructures, 9 (7), p. 98. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9070098>
- Wright, L.; Davidson, S. (2020). *How to tell the difference between a model and a digital twin*. Advanced Modelling and Simulation in Engineering Sciences, 7 (1), p. 13. <https://doi.org/10.1186/s40323-020-00147-4>
- Wu, J.; Chen, J.; Chen, G.; Wu, Z.; Zhong, Y.; Chen, B.; ... Huang, J. (2021). *Development of Data Integration and Sharing for Geotechnical Engineering Information Modeling Based on IFC*. Advances in Civil Engineering, 2021 (1), p. 8884864. <https://doi.org/10.1155/2021/8884864>
- Xiao, P.; Zhao, R.; Li, D.; Zeng, Z.; Qi, S.; Yang, X. (2022). *As-Built Inventory and Deformation Analysis of a High Rockfill Dam under Construction with Terrestrial Laser Scanning*. Sensors, 22 (2), p. 521, Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/s22020521>
- Zhou, Y.; Bao, T.; Shu, X.; Li, Y.; Li, Y. (2023). *BIM and ontology-based knowledge management for dam safety monitoring*. Automation in Construction, 145 (104649), Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104649>
- Zhu, X.; Bao, T.; Yeoh, J. K. W.; Jia, N.; Li, H. (2021). *Enhancing dam safety evaluation using dam digital twins*. <https://doi.org/10.1080/15732479.2021.1991387>, pp. 1–17, Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/15732479.2021.1991387>

SELLADO ADSORBENTE DE BASE DE VERTEDERO PARA LA GESTIÓN DE PFAS: DESAFÍOS Y SOLUCIONES CON GEOTEXTILES

Adsorptive landfill base sealing for PFAS risk management: Challenges and geotextile solutions

Marco T. Rodríguez^a, Stefan Niewerth^b, James Feest^c, Gus Martins^d

^a HUESKER Geosintéticos SAU, España.

^b HUESKER Synthetic GmbH, Alemania.

^c HUESKER Reino Unido.

^d HUESKER Australia Pty Ltd.

RESUMEN – Las sustancias per- y polifluoroalquiladas (PFAS) son contaminantes ambientales persistentes reconocidos por su resistencia a la degradación, incluidos en el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. Este documento aborda los retos de la gestión de suelos contaminados con PFAS en vertederos, con especial atención a las limitaciones del diseño convencional de los sistemas de contención. Aunque los revestimientos compuestos tradicionales de los vertederos se emplean habitualmente, no impiden totalmente el escape y la propagación de PFAS de los vertederos. Este estudio examina el uso de filtros geosintéticos de contaminantes (GCF) como método avanzado para mejorar la contención de PFAS. Los ensayos de laboratorio y de campo demuestran la eficacia de estos filtros para reducir la movilidad de los PFAS en los vertederos. Los resultados sugieren que la incorporación de GCF en los diseños de vertederos puede mejorar la contención a largo plazo y mitigar los riesgos asociados a los lixiviados de PFAS.

ABSTRACT – Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are persistent environmental pollutants recognized for their resistance to degradation. Widely used in various industrial and consumer products, PFAS have led to extensive soil and water contamination, prompting regulatory action such as their inclusion in the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. This paper addresses the challenges of managing PFAS-contaminated soils in landfills, with particular focus on the limitations of conventional design of containment systems. While traditional landfill composite liners are commonly employed, they will not fully prevent PFAS escape and spread from landfills. This study examines the use of geosynthetic contaminant filters (GCF) as an advanced method to enhance PFAS containment. Laboratory and field trials demonstrate the effectiveness of these filters in reducing PFAS mobility within landfill environments. The findings suggest that incorporating GCF into landfill designs can improve long-term containment and mitigate risks associated with PFAS leachate.

Palabras Clave – PFAS, residuos, contención.

Keywords – PFAS, waste, containment.

E-mails: mrodriguez@huesker.es (M. Rodríguez), niewerth@huesker.de (S. Niewerth), jamesf@huesker.co.uk (J. Feest), gus@huesker.co (G. Martins)

ORCID: orcid.org/0009-0006-7046-2288 (M. Rodríguez), orcid.org/0009-0002-7057-7350 (S. Niewerth), orcid.org/0009-0001-9254-5037 (J. Feest), orcid.org/0009-0005-1747-3917 (G. Martins)

1 – INTRODUCCIÓN

Las sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) son un grupo de compuestos químicos sintéticos caracterizados por sus fuertes enlaces carbono-flúor, que les otorga una excepcional estabilidad y resistencia a la degradación. Estos compuestos han sido ampliamente utilizados desde mediados del siglo XX en diversos productos industriales y de consumo, como utensilios de cocina antiadherentes, tejidos hidrófugos, espumas para extinción de incendios y envases alimentarios debido a su capacidad para resistir el calor, el agua y el aceite. Sin embargo, esta misma resistencia química que hace tan útiles a los PFAS también ha provocado su persistencia en el medio ambiente, lo que les ha valido el apodo de "químicos eternos". La movilidad de los PFAS en el entorno, especialmente a través del suelo y el agua, permite que estas sustancias migren lejos de sus fuentes originales, lo que provoca la contaminación de aguas subterráneas y superficiales, así como de grandes volúmenes de suelo. La contaminación del suelo por PFAS suele estar asociada a emplazamientos específicos en los que a lo largo del tiempo se ha empleado o liberado estos compuestos en grandes cantidades. Un ejemplo son los aeropuertos civiles y militares, en particular aquellos donde se han utilizado espumas formadoras de película acuosa (AFFF, por sus siglas en inglés), destacando como una de las fuentes más comunes de contaminación del suelo por PFAS. Además, emplazamientos relacionados con la fabricación industrial, la gestión de residuos y las instalaciones de tratamiento de aguas residuales son otros lugares que suelen mostrar niveles elevados de PFAS debido tanto a emisiones en el pasado como actuales. Las tierras agrícolas también pueden verse afectadas, especialmente en aquellos casos en los que se han aplicado biosólidos o lodos que contienen PFAS como fertilizantes. La naturaleza persistente de los PFAS, combinada con su capacidad para filtrarse desde los suelos a las masas de agua, subraya la urgente necesidad de estrategias integrales para evaluar, gestionar y remediar los lugares contaminados.

Entre todas las normativas en tramitación relacionadas con los PFAS, una cosa parece segura: un gran volumen de suelo contaminado con PFAS acabará en vertedero. En Australia, por ejemplo, el 88% del suelo se deposita en vertederos (Pickin et al., 2022) estas instalaciones ofrecen la posibilidad técnica de contener los PFAS a un coste económico razonable y dentro de las directrices normativas. Para garantizar un almacenamiento seguro, los vertederos están equipados con sistemas de recogida de lixiviados y revestimientos impermeables para evitar que los PFAS escapen al medio ambiente. Sin embargo, la eficacia a largo plazo del vertido como estrategia de gestión de los PFAS sigue siendo objeto de debate. Cuando se elige esta opción de gestión, se transportan grandes cantidades de suelo a una instalación diseñada para albergarlo durante un largo período de tiempo. Este movimiento de tierras se planifica de antemano, y se instala una barrera geotécnica para proporcionar su contención durante décadas o incluso más de cien años. Un sistema con dos barreras superior e inferior permite mantener los contaminantes encapsulados.

2 – MARCO LEGAL SOBRE SUELOS CONTAMINADOS CON PFAS

La regulación y gestión de los suelos contaminados con PFAS se ha vuelto cada vez más estricta a medida que se han ido comprendido mejor los riesgos ambientales y para la salud asociados con estos compuestos. Sin embargo, debido a la complejidad y persistencia de los PFAS, el panorama legal aún está en evolución, y las normativas varían considerablemente según la región del mundo. En Estados Unidos, por ejemplo, la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) ha empezado a establecer límites normativos para determinados compuestos de PFAS en 2024 en virtud de las leyes (*Safe Drinking Water Act, 1974*) y la (*Toxic Substances Control Act. Amended by the Frank R. Lautenberg Chemical Safety for the 21st Century Act, 2016*). Sin embargo, por ahora no existe ninguna normativa federal específica sobre los PFAS en el suelo, por lo que los estados tienen que adoptar sus propias guías técnicas y normas. Aunque la normativa no está completamente desarrollada, y probablemente no lo estará durante algún tiempo, es de vital importancia definir los límites de contaminación admisibles propuestos para los PFAS en relación con otros contaminantes

comunes. La propuesta actual de la EPA para PFAS permitidos en el agua potable es de 4 partes por billón o ppt (ng/l). Los niveles de regulación propuestos por Australia son algo más elevados (290 ppt para aplicaciones similares). El punto crítico es que las mediciones en el rango de partes por billón son de cuatro a seis órdenes de magnitud inferiores a las de otros contaminantes comunes: bifenilos policlorados (PCB), compuestos aromáticos halogenados y no halogenados y otros. La Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA) establece niveles de tolerancia para los PCB en los alimentos que oscilan entre 0,2 y 3 ppm (mg/l); la norma propuesta por EE. UU. sobre PFAS para el agua potable es 1000000 de veces más estricta que ésta. Para una comparación más visual, 4 ppt son comparables en magnitud a 4 segundos en 31,709 años.

En la Unión Europea, la normativa sobre PFAS se rige principalmente por el Reglamento sobre registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias y preparados químicos (REACH), que ha restringido el uso de determinados compuestos de PFAS y avanza hacia restricciones más amplias. La Comisión Europea ha propuesto una prohibición completa de todos los PFAS para 2030, excepto para usos esenciales. Además, la Directiva Marco del Agua (*Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, 2000*) y la Directiva de Aguas Subterráneas (*Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de diciembre de 2006, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro, 2006*), incluyen disposiciones para vigilar y controlar los PFAS en el medio ambiente. La Directiva Marco del Agua fija valores límites para el total de PFAS de 0,5 ppb (μl) y de 0,1 ppb para la suma de PFAS que se consideren un problema para el consumo, y establece un período transitorio hasta el 12 de enero de 2026 para la aplicación de medidas al respecto de estos valores. Por contra, no se ha desarrollado aún ninguna normativa específica que limite la concentración de estas sustancias en el suelo.

En España, la ley de referencia en materia de suelos contaminados es la (*Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular, 2022*), y el (*Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados, 2005*). Este Real Decreto establece los criterios para decidir si un suelo está contaminado o no. El suelo será declarado contaminado cuando se determine un riesgo inaceptable para la salud o los ecosistemas. Por tanto, no se trata sólo de fijar un valor máximo para un contaminante, sino de considerar tanto la situación actual como la futura, la probabilidad de exposición y la peligrosidad del contaminante. El Anexo V del *Real Decreto 9/2005, de 14 de enero*, recoge los niveles de referencia genéricos de las principales sustancias químicas para la protección de la salud humana y el Anexo VI para la protección de los ecosistemas. En ninguno de los dos anexos se hace mención específica a los compuestos per- y polifluoroalquilados (PFAS). Esto puede atribuirse en parte a la ausencia de una legislación armonizada sobre suelos contaminados a escala europea, ya que hasta ahora la legislación sobre suelos contaminados se ha aplicado a través de políticas sectoriales o en relación con las aguas subterráneas, es decir, indirectamente. La prioridad de restricción del legislador europeo se ha centrado en la restricción de estos compuestos en origen, en relación con los alimentos y recientemente en el agua potable, donde ya aparecen explícitamente diferentes PFAS. No obstante, el *Real Decreto 9/2005, de 14 de enero*, especifica en su Anexo VII los criterios para el cálculo de los niveles de referencia de sustancias no incluidas en los Anexos V y VI, como los PFAS, para cada caso concreto investigado, en función del uso del suelo, características del individuo más expuesto, vías de exposición, etc. A partir de estos datos razonados, se calcula para cada caso la concentración máxima admisible en el suelo de la sustancia en cuestión.

La Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular prioriza los tratamientos *in situ* que eviten la generación, traslado y eliminación de residuos siempre que sea posible. En la actualidad, los tratamientos más avanzados para la eliminación de los PFAS se centran en el tratamiento del agua potable, aunque para los suelos existen tecnologías aún en fase

inicial de desarrollo. El marco legal prevé el depósito de suelos contaminados en vertederos controlados si cualquier acción de remediación es inviable y el suelo es tratado como residuo.

La referencia legal en España es el (*Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*, 2020), derogado por la actual (*Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular*, 2022). Este Real Decreto establece tres tipos de categorías de vertederos: para residuos peligrosos, no peligrosos e inertes. Para elegir el tipo de vertedero para los suelos contaminados, debe realizarse una caracterización básica del residuo (suelo) y evaluarse su peligrosidad, con un código espejo del Código Europeo de Residuos (CER).

En cualquier caso, la eliminación de suelos contaminados con PFAS en vertederos, independientemente de la categoría, conlleva la adaptación del diseño de los vertederos para evitar el paso de los PFAS al lixiviado. Hay evidencias de que los lixiviados de vertedero son una importante fuente secundaria de hasta 31 sustancias per- y polifluoroalquiladas (PFAS), incluidos los vertederos de residuos inertes (Fuertes et al., 2017).

3 – ESTADO DE LA TÉCNICA EN LA CONTENCIÓN DE PFAS EN VERTEDEROS

3.1 – Revestimientos compuestos para vertederos

Los revestimientos compuestos son una parte integral del diseño actual de vertederos, destinados a contener los lixiviados y evitar la contaminación del suelo y aguas subterráneas circundantes. Generalmente consiste en la disposición de varias capas, cada una con una función específica. De manera general, los diseños siguen un esquema que se compone (de abajo hacia arriba) de un revestimiento de arcilla compactada y/o una geomembrana. A esto le sigue una capa de protección mineral o geosintética y una capa de drenaje. Es habitual colocar también un geosintético con función de filtración o separación entre la capa de drenaje y los residuos (Figura 1).

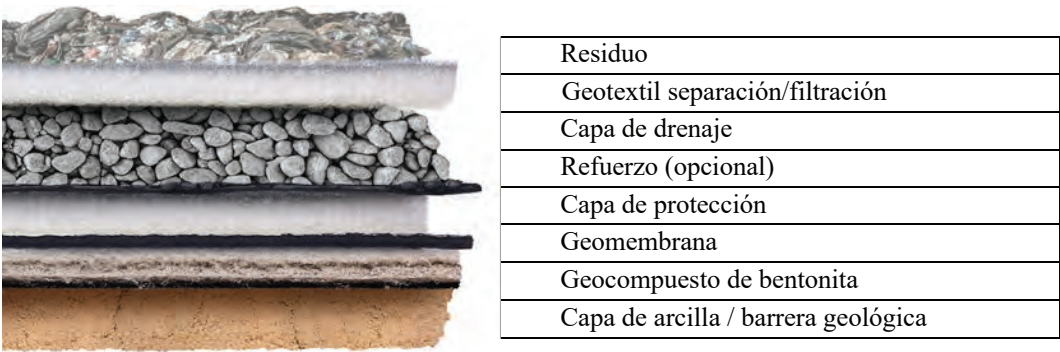


Fig. 1 – Esquema general de un sistema de sellado de la base de un vertedero.

La geomembrana, normalmente fabricada de polietileno de alta densidad (HDPE), proporciona una barrera duradera, flexible e impermeable para evitar que el lixiviado se filtre a las capas subyacentes. La capa de drenaje por encima de la geomembrana suele ser de grava gruesa. Recoge y canaliza los lixiviados hacia el sistema de recogida y tratamiento de lixiviados del vertedero. Esta capa reduce la carga hidráulica sobre la geomembrana y minimiza el riesgo de penetración de lixiviados. La combinación de estas capas en un sistema de revestimiento compuesto ofrece una barrera sólida y segura, que garantiza la protección del medio ambiente a largo plazo y el cumplimiento de las normas reglamentarias. Sin embargo, los PFAS son especialmente preocupantes en los vertederos debido a su gran movilidad y a su potencial para migrar a través de los revestimientos al entorno. El transporte a través de los revestimientos se produce principalmente por tres mecanismos:

- Advección: Si hay defectos, perforaciones o imperfecciones en el sistema de revestimiento de varias capas, el lixiviado con PFAS puede desplazarse a través de estas aberturas por advección. La advección implica el transporte de contaminantes con el movimiento del agua. Incluso pequeñas fisuras o perforaciones en el revestimiento pueden permitir que los PFAS escapen al medio ambiente circundante, aumentando significativamente el riesgo de contaminación.
- Difusión: A pesar de estar diseñadas como barreras impermeables, las geomembranas no son completamente resistentes a los PFAS. Las moléculas de PFAS pueden migrar muy lentamente a través de la geomembrana por difusión, impulsadas por un gradiente de concentración. Debido a su pequeño tamaño molecular y a su persistencia, los PFAS pueden penetrar en el material del revestimiento con el tiempo, lo que puede provocar una contaminación ambiental.
- Sorción y desorción: Aunque las capas de arcilla de los revestimientos compuestos pueden adsorber temporalmente moléculas de PFAS, este proceso es reversible. Los cambios en las condiciones ambientales, como fluctuaciones de pH o temperatura, pueden hacer que los PFAS adsorbidos previamente se desorban y vuelvan a entrar en el lixiviado, lo que provoca una liberación retardada pero persistente del vertedero.

La persistencia y movilidad de los PFAS implica que incluso los actuales revestimientos compuestos bien diseñados puedan no impedir totalmente la migración de estas sustancias a largo plazo. Esto destaca la importancia de contar con sistemas de vigilancia eficaces y la necesidad de soluciones de tratamiento avanzadas para gestionar los PFAS en los lixiviados de los vertederos.

3.1.1 – Advección

La efectividad y rendimiento de un sistema de revestimiento de múltiples capas está bien descrito en el informe de la EPA de EE. UU. *Assessment and Recommendations for Improving the Performance of Waste Containment Systems* (EPA/600/R-02/099). En este informe (Bonaparte et al., 2002) publicaron los datos presentados (Figura 2) correspondientes a una geomembrana aislada (GM), un revestimiento compuesto de geomembrana y arcilla compactada (GM/CL) y una geomembrana y un revestimiento de arcilla geosintética (GM/GCL) a partir de datos de varios vertederos en distintas fases de funcionamiento, mostrando los valores correspondientes a fugas en el eje de ordenadas. Estos datos muestran que los sistemas de revestimiento compuesto funcionan mejor que una geomembrana aislada, y que el sistema de GM/GCL presenta los índices de fugas totales más bajos, cercanos a cero tras la colocación de la cubierta final. Por otra parte, un revestimiento compuesto se diseña como un sistema redundante que permite detectar señales de alarma.

En ingeniería, siempre es prudente diseñar de manera conservadora y prever un funcionamiento del sistema diseñado que no sea perfecto (Giroud y Bonaparte, 1989). En caso de producirse una fuga en el revestimiento primario, opción que debe tenerse en cuenta, el fluido, muy probablemente contaminado por PFAS podría ser retenido en cierta medida por el geocompuesto de arcilla que se expandiría, y actuaría tanto como barrera ante la fuga como de sellado y “reparación” de la geomembrana primaria al rellenar la rotura causante de la fuga con arcilla de muy baja permeabilidad. El aumento en la recogida de fluido en el sistema de detección de fugas actuaría como señal de alarma, permitiendo al operador del vertedero ser consciente de la situación, investigar y tomar medidas correctoras adecuadas. Por tanto, todos estos materiales que trabajan en conjunto tendrían que fallar para que se produjera una fuga. Un fallo de este tipo es muy poco probable e históricamente este diseño ha funcionado bien en la contención de PCB y otros materiales regulados.

Sin embargo, para los niveles de contención propuestos para los PFAS esta configuración puede no ser suficiente, ya que el objeto de contención es de varios ordenes de magnitud diferente.

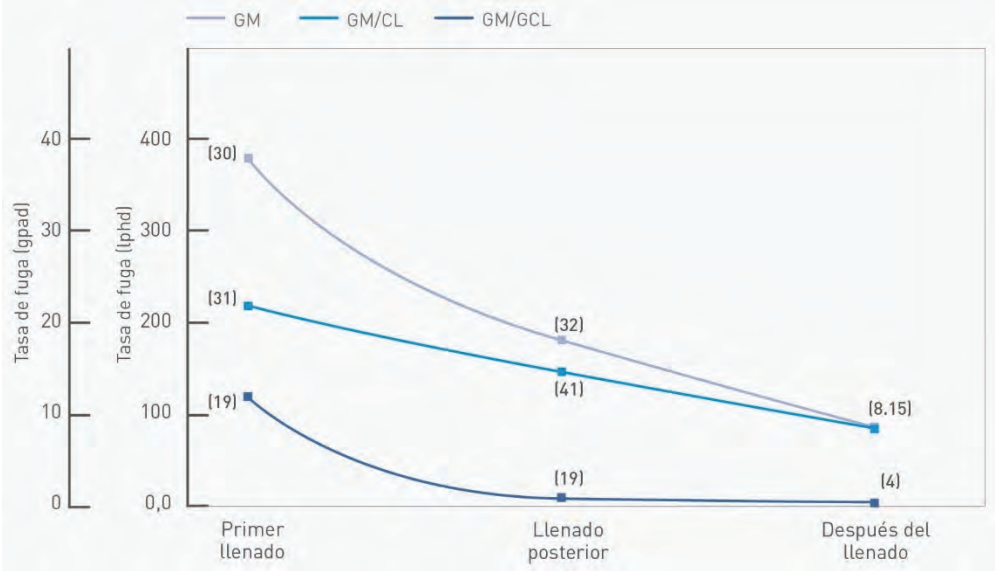


Fig. 2 –Tasas de fuga con geomembrana (GM) y varias capas (GM/CL y GM/GCL, respectivamente) (Bonaparte et al.,2002).

3.1.2 – Difusión

En el caso de difusión y en contraste con el caso anterior de fuga puntual a través de una fisura en la barrera, el contaminante se mueve a través de la geomembrana y de la barrera de arcilla. Una geomembrana es una lámina termoplástica diseñada específicamente para contener residuos. El polímero más utilizado para estas aplicaciones es el polietileno, y esto es así por varias razones bien conocidas: son duraderas, son resistentes a la deformación y perforación, sus propiedades físicas son bien conocidas y están testadas de manera independiente y, finalmente, porque se ha desarrollado con el tiempo procedimientos y tecnología para su correcta puesta en obra y ensayo de calidad. Pero quizá el factor que más contribuye a la selección de este material como barrera principal es el de la resistencia química. Las geomembranas de polietileno no se ven afectadas por pH extremos, ácidos, bases, agentes oxidantes y reductores, ni por los productos químicos más comunes. Son excelentes barreras para combustibles, aceites, gasolina, detergentes, compuestos de limpieza, disolventes y una gama casi universal de productos químicos. Sin embargo, existe una pequeña familia de un tipo concreto de sustancias químicas que sí interactúan con las geomembranas de HDPE: los materiales halogenados de bajo peso molecular, similares a los PFAS. Estos tipos de materiales, caracterizados históricamente por el dicloruro de etileno, el diclorometano u otros, penetran en las geomembranas de HDPE a una velocidad mayor que otros tipos de productos químicos. La exposición de una geomembrana de polietileno a materiales halogenados de bajo peso molecular provoca que la geomembrana aumente en volumen y que sus propiedades físicas y el rendimiento como barrera se vean afectadas negativamente. Hasta la fecha se han publicado numerosas investigaciones como la realizada por (Chao et al., 2006). A partir de ellas se han podido establecer índices de permeación para geomembranas en contacto con diferentes sustancias químicas, que permiten a un ingeniero proyectista estimar las fugas y diseñar en consecuencia la barrera sintética. Desde mediados de 2020 se han comenzado a realizar ensayos de permeabilidad con PFAS. Recientemente, se han publicado resultados a este respecto por (Di Battista et al., 2020). Este estudio ha sido realizado siguiendo la

normativa ASTM F739 (American Society for Testing and Materials, 2020) para una geomembrana que separaba dos celdas. En la primera celda se colocó el contaminante y la segunda se utilizó como receptor, midiendo a intervalos regulares la presencia y concentración del contaminante que ha atravesado la barrera. Se emplearon como contaminantes el ácido perfluorohexano sulfónico y ácido perfluorooctanoico, identificados en la Tabla 1 como PFOS y PFOA, respectivamente. Los niveles de concentración utilizados para la introducción de contaminantes/permeantes fueron bajos: 20-30 ppm para varios conjuntos de muestras y aproximadamente 60 ppb para otros grupos adicionales. La cuantificación se realizó mediante mediciones de espectrometría de masas de cromatografía líquida con muestras duplicadas para garantizar una medición precisa y replicable del contenido.

En la Tabla 1 se muestra la comparativa de los valores de permeabilidad obtenidos para PFOA y PFOS con valores históricamente bien establecidos de otros contaminantes como el benceno u otros materiales aromáticos como el PCB otro contaminante duradero y omnipresente. Los índices de permeabilidad de los materiales del tipo PFAS obtenidos fueron menores en cuatro órdenes de magnitud que los de los aromáticos y en siete órdenes de magnitud menores que los PCB. También se pudo comprobar que la permeabilidad de los productos químicos del tipo PFAS es 1000 veces más lenta que la del resto de contaminantes estudiados.

Tabla 1 – Valores obtenidos de PFOA y PFOS de coeficiente de masa molar (M_w), coeficiente de difusión (D_g), coeficiente de distribución (Sgf), y coeficiente de permeabilidad (P_g) en comparación con valores de referencia según bibliografía de otras sustancias químicas a temperatura ambiente (Di Battista et al., 2020).

Contaminante	log Kow (–)	Mw (g/mol)	Dg (m²/s)	Sgf (–)	Pg (m²/s)
PFOA – CoEx 0.1 mm	4.81 ^c	414.07	–	–	<2.6 × 10 ⁻¹⁷
PFOS – CoEx 0.1 mm	4.49 ^c	500.13	–	–	<5.5 × 10 ⁻¹⁷
PFOA – LLDPE 0.1 mm	4.81 ^c	414.07	<2.5 × 10 ⁻¹⁷	0.9–1.4	<3.1 × 10 ⁻¹⁷
PFOS – LLDPE 0.1 mm	4.49 ^c	500.13	<4 × 10 ⁻¹⁷	2.8–5.3	<1.6 × 10 ⁻¹⁶
Benceno	2.15 ^f	78.11	2.2 × 10 ⁻¹³	200	4.4 × 10 ⁻¹¹
Tolueno	2.73 ^f	92.14	2.2 × 10 ⁻¹³	350	7.7 × 10 ⁻¹¹
Etilbenceno	3.15 ^f	106.17	1.0 × 10 ⁻¹³	925	9.2 × 10 ⁻¹¹
m&p-Xileno	3.15–3.2 ^f	106.16	0.8 × 10 ⁻¹³	900	7.2 × 10 ⁻¹¹
o-Xileno	3.16 ^f	106.16	0.8 × 10 ⁻¹³	900	7.2 × 10 ⁻¹¹
PCB Aroclor 1242	6.98 ^c	291.98	5–50 × 10 ⁻¹⁵	90,000–325,000	0.45–16 × 10 ⁻⁹
BPA	3.64 ^c	228.29	–	–	2.9 × 10 ⁻¹⁵
Fenol	1.46 ^c	94.11	1.7 × 10 ⁻¹⁴	3.48	5.9 × 10 ⁻¹⁴
PBDE (Mezcla DE-71)	6.81–7.90 ^d	564.7	4 × 10 ⁻¹⁵	1,800,000	7.2 × 10 ⁻⁹

^a LLDPE (Di Battista and Rowe, 2020).

^b HDPE (Rowe et al., 2016a).

^c HDPE (Saheli et al., 2016).

^d HDPE (Rowe et al., 2016b).

^e Calculado mediante US EPA Industry Interface Estimation Suite (US EPA, 2012)

^f Montgomery and Welkom (1989).

3.1.3 – Expectativas de rendimiento

A partir del estudio descrito anteriormente y los antecedentes, ahora ya es posible estimar la cantidad de PFAS que podría filtrarse a través de un sistema de revestimiento compuesto en vertederos, teniendo en cuenta la posibilidad de que se produzcan defectos o daños en las barreras. Como se ha descrito en este documento y en muchos otros documentos y guías técnicas de ingeniería, no se debe dar por sentado un rendimiento «perfecto» de las barreras de geomembrana o de materiales compuestos. La posibilidad de defectos o daños en las barreras debe tenerse en cuenta y debe esperarse que ocurran. (Tan et al., 2023) sugieren que un revestimiento geocompuesto normal (con defectos) presenta fugas de PFAS a una tasa estimada de 0,28 ng/m²/año. Estos valores tienen una lógica coherente con las normas históricas y el rendimiento.

El problema es que, aunque se trata de una cantidad pequeña, es en realidad enorme si se evalúa en términos de las cantidades límite que están proponiendo las actuales normativas en desarrollo.

3.2 – Sistemas de tratamiento de lixiviados de vertederos

Los lixiviados de los vertederos, en particular los que contienen PFAS, plantean importantes problemas de tratamiento. Los métodos tradicionales de tratamiento de lixiviados, como el tratamiento biológico, la coagulación y la sedimentación, son ineficaces para eliminar los PFAS debido a la resistencia de estas sustancias químicas a la degradación y a su tendencia a permanecer en la fase acuosa. Por consiguiente, se necesitan tecnologías de tratamiento especializadas para gestionar eficazmente los lixiviados contaminados con PFAS. Además, el tratamiento de los lixiviados que contienen PFAS es considerablemente más caro que el de los lixiviados convencionales, debido a las tecnologías especializadas necesarias y a la naturaleza persistente de estas sustancias químicas. Las técnicas más utilizadas son la adsorción en carbón activado (CA), resinas de intercambio iónico y la filtración por membrana, como la ósmosis inversa. El CA actúa adsorbiendo las moléculas de PFAS en su superficie, eliminándolas eficazmente del agua. Sin embargo, el CA es más eficaz para los compuestos de PFAS de cadena larga y puede requerir una sustitución o regeneración frecuente cuando se tratan PFAS de cadena corta o concentraciones elevadas. Las resinas de intercambio iónico son otra alternativa eficaz para eliminar los PFAS de los lixiviados, en particular los PFAS de cadena corta, que son más difíciles de capturar. Estas resinas funcionan no sólo por adsorción sino también intercambiando iones en el lixiviado con iones adheridos a la resina, eliminando selectivamente los PFAS de la solución.

La ósmosis inversa también es muy eficaz para separar los PFAS del lixiviado. El método utiliza membranas semipermeables para filtrar las moléculas de PFAS en función de su tamaño y carga, lo que da como resultado un flujo de agua purificada y un flujo de residuos concentrado (salmuera). La salmuera requiere un tratamiento posterior o una eliminación segura, lo que añade complejidad al proceso. Todas estas tecnologías de tratamiento *ex situ* necesitan además de energía eléctrica y agua dulce, infraestructuras e instalaciones operativas. Conllevan costes de capital para la instalación, costes operativos continuos de mantenimiento, renovación, limpieza y consumo de energía. Tras su uso, surgen costes de eliminación o regeneración de las sustancias residuales o de la salmuera generada en los sistemas de membranas. La eliminación de las sustancias residuales suele implicar la incineración o el depósito en vertederos. Los costes globales del tratamiento de los suelos con PFAS en los vertederos incluyen también otros gastos, por ejemplo, la elaboración de ensayos, informes y seguimiento de la actividad.

En conclusión, la presencia de PFAS en los lixiviados de los vertederos plantea retos importantes tanto para la contención como para el tratamiento. Los revestimientos compuestos de los vertederos, aunque eficaces para muchos contaminantes, pueden no impedir totalmente la migración de PFAS debido a las propiedades químicas únicas de estas sustancias. Además, se necesitan tecnologías avanzadas de tratamiento de lixiviados para gestionar eficazmente la propagación de la contaminación por PFAS. Sin embargo, estas tecnologías conllevan costes considerables, derivados de la complejidad de los procesos de tratamiento. A medida que aumente la concienciación medioambiental y la presión normativa, el desarrollo de soluciones de contención más eficientes y rentables será fundamental para hacer frente a los retos que plantean las PFAS en los lixiviados de vertedero.

4 – NUEVO SISTEMA DE REVESTIMIENTO ADSORBENTE DE VERTEDEROS

4.1 – Filtración de contaminantes *in situ*

La mayoría de los vertederos de Europa o EE. UU. utilizan sistemas de revestimiento compuesto para controlar las fugas y los flujos de agua. Sin embargo, la experiencia, las pruebas y los cálculos

indican que es muy probable que los sistemas de revestimiento compuesto no contengan los PFAS dentro de los niveles reglamentarios propuestos, que se sitúan en el intervalo de partes por trillón (ppt). Una opción innovadora para cumplir los requisitos es la utilización de sistemas de revestimiento que incluyan un componente diseñado para eliminar selectivamente las PFAS de los lixiviados (Martins, 2022). Se han desarrollado y ensayado productos de este tipo, que han demostrado niveles muy altos de captura de PFAS, en toda una gama de variedades y concentraciones. Estos productos sustituyen al geotextil no tejido de separación situado sobre la capa de drenaje mineral, para tratar el lixiviado antes de que salga del vertedero o de la zona específica del vertedero utilizada para el vertido de suelo con PFAS. Los filtros geosintéticos de contaminantes (GCF) representan un enfoque nuevo y fundamentalmente diferente de la protección del suelo y las aguas subterráneas. Protegen el subsuelo eliminando las sustancias perjudiciales para el medio ambiente del lixiviado a medida que éste se infiltra a través del geocompuesto, tal y como se muestra esquemáticamente en la Figura 3 (Niewerth, S., 2021a). El agua de infiltración se carga con las sustancias químicas y se convierte así en lixiviado crítico. Este lixiviado transporta los PFAS al GCF permeable al agua. Aquí, el filtrado se trata pasivamente antes de seguir filtrándose en la capa de drenaje mineral con una concentración de contaminantes «casi nula».



Fig. 3 – Esquema de funcionamiento de un filtro geosintético de contaminantes, HUESKER Synthetic GmbH.

4.2 – Filtro geosintético de contaminantes

El término filtro geosintético de contaminantes (GCF) se refiere a un nuevo grupo de productos en el campo de los geosintéticos. Incluye productos formados por dos o más capas de geotextiles que intercalan un material de relleno o enmienda, como se muestra en la Figura 4. Debido a su novedad, el término aún no se ha normalizado. Por ello, en algunos casos se utilizan términos diferentes, como geotextil de sorción o barrera geotextil anticontaminante. Sin embargo, todos los términos se refieren al mismo grupo de productos.

4.2.1 – Componentes geotextiles

Los geotextiles empleados son tejidos y/o no tejidos. Se unen mediante técnicas de unión mecánica, como el punzonado o el cosido. Los GCF tienen un coeficiente de permeabilidad $k \geq 1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Esto es importante para garantizar que el lixiviado pueda fluir a través del filtro sin obstáculos. Los distintos geotextiles asumen funciones específicas para cada aplicación (Niewerth y Wilke, 2021). Para el uso en sistemas de revestimiento de vertederos son especialmente relevantes las funciones de separación y filtración, que se definen según UNE-EN ISO 10318-1:2015/A1:2019 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2015) como:

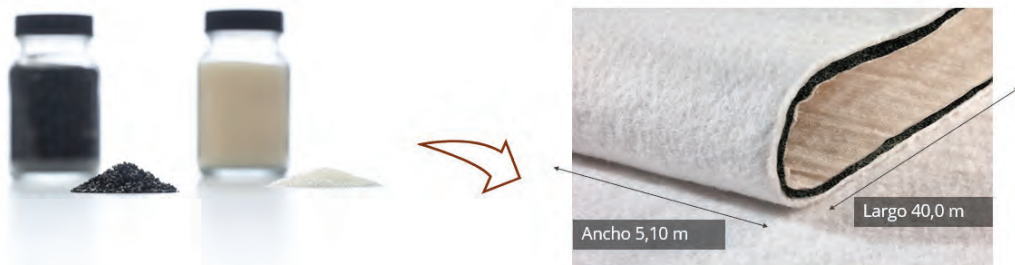


Fig. 4 – Filtro geosintético de contaminantes para el tratamiento de PFAS HUESKER Synthetic GmbH (derecha) y materiales activos (izquierda).

- Separación: prevención de la mezcla de suelos y/o materiales de relleno disímiles adyacentes mediante el uso de un material geosintético.
- Filtración: contención del paso incontrolado de tierra u otras partículas sometidas a fuerzas hidrodinámicas, al tiempo que se permite el paso de fluidos al interior o a través de un material geosintético.
- Refuerzo: utilización del comportamiento tensión-deformación de un material geosintético para mejorar las propiedades mecánicas del suelo o de otros materiales de construcción.

Además, la durabilidad de los materiales es de suma importancia para su uso en vertederos. Estas instalaciones pueden diseñarse para una vida útil de 100 años. Por tanto, todos los componentes deben tener esta durabilidad. Se pueden utilizar ensayos de oxidación *in situ* para simular el envejecimiento de los geotextiles y hacer estimaciones sobre la vida útil. Para geotextiles de calidad correctamente instalados puede considerarse normal una vida útil de 100 años.

4.2.2 – Enmiendas

Las enmiendas son materiales que eliminan sustancias o contaminantes relevantes para el medio ambiente de un medio líquido o gaseoso y los unen a su estructura. Dado que no todas las enmiendas son adecuadas para todos los contaminantes, debe seleccionarse el tipo más adecuado para la aplicación específica. Para ello, el contaminante debe ser suficientemente conocido. Los PFAS son un grupo formado por varios miles de compuestos individuales diferentes. La variación en la longitud de la cadena de carbono y el grupo funcional da lugar a esta gran variedad de moléculas diferentes. El reto en el tratamiento del agua es eliminar el mayor número posible de compuestos PFAS diferentes con el material y la tecnología seleccionados. Al mismo tiempo, hay que tener en cuenta que en los lixiviados de vertedero siempre están presentes otros co-contaminantes en concentraciones elevadas. En estudios de laboratorio y de campo, se ha demostrado que un medio específico de intercambio aniónico fuerte es muy eficaz para la eliminación de una amplia gama de compuestos individuales de PFAS, incluso con un tiempo de contacto comparativamente corto con el lixiviado. Además de la alta efectividad del medio, la capacidad de eliminación de muchos compuestos individuales de PFAS también es alta cuando se utiliza el intercambiador selectivo de aniones. Dependiendo de la composición del lixiviado, la capacidad del intercambiador de aniones es mucho mayor que la del carbón activado o las arcillas organófilas. Otra ventaja es la fuerte unión entre los PFAS y el intercambiador selectivo de aniones, ya que los PFAS no sólo se absorben por medio de las fuerzas de Van-der-Waals, sino sobre todo a través del intercambio de iones. Estos mecanismos dificultan enormemente la desorción, incluso con la ayuda de disolventes. Este aspecto

es fundamental y muy relevante para las aplicaciones a largo plazo. Para estudiar el uso en el filtrado de lixiviados de vertedero, se ha completado un extenso programa de pruebas con diferentes modificaciones, obteniendo como resultado que la adición de carbón activado al intercambiador selectivo de aniones es ventajosa para la aplicación específica en el tratamiento de lixiviados. La eficacia de un intercambiador de aniones para una molécula objetivo particular puede reducirse considerablemente si están presentes ciertos tipos de impurezas. Los contaminantes típicos que afectan al rendimiento incluyen compuestos orgánicos disueltos (DOC), aniones como cloruro o sulfato, orgánicos pesados como aceites y grasas, y partículas finas y sólidos en suspensión. A pesar de su fuerte afinidad por los PFAS, otros aniones y el carbono orgánico disuelto (DOC), también compiten con las moléculas de PFAS por los sitios libres de intercambio adsorptivo. Además, el DOC con un peso molecular alto puede acumularse en la superficie y reducir el acceso a las superficies y poros del intercambiador de aniones. Por estas razones, la adición de carbono como material de sacrificio ofrece una ventaja significativa para el rendimiento global del geocompuesto activo. En cuanto a la capacidad de sorción, el carbón activado también es capaz, por supuesto, de aglutinar PFAS específicos. Sin embargo, el rendimiento se limita esencialmente a las moléculas de cadena larga. Dado que el intercambiador de aniones libera iones H^+ para dar espacio a los PFAS, el valor de pH se vuelve favorable para que el carbón activado adsorba los PFAS. Respecto al comportamiento de desorción, cabe destacar que, para aplicaciones a largo plazo como los filtros de lixiviados, no se recomienda el uso exclusivo de carbón. Las moléculas de PFAS de cadena corta previamente absorbidas pueden desorberse del carbón con un desfase temporal al competir con moléculas de DOC o de PFAS de cadena larga.

Además de los beneficios de los diferentes aditivos, la interacción del lixiviado con los geotextiles también es importante para la durabilidad del producto. Como se mencionó anteriormente, los sólidos en suspensión, las partículas finas o los contaminantes de mayor tamaño son problemáticos para las enmiendas. En casi todos los lixiviados de vertedero están presentes estas partículas finas. Por lo tanto, es imperativo evitar que las partículas finas obstruyan los gránulos y dificulten el acceso a la superficie funcional del medio o a los poros, para llevar a cabo con éxito la filtración. Por lo tanto, se requieren geotextiles no tejidos adecuados con un ancho de apertura definido para la filtración y la protección de los aditivos.

4.3 – Criterios clave de diseño para la capa de material de tratamiento

La enmienda se coloca entre los geotextiles con un peso variable por unidad de superficie [kg/m^2] y, en consecuencia, con un grosor variable [mm]. El peso elegido depende en gran medida de los parámetros específicos de cada instalación, que son cruciales para el diseño de la capa absorbente de los CGF (Niewerth, S., 2021). Sin embargo, para hacerse una idea, el grosor está en el rango de 10 mm. Para desarrollar un GCF eficiente, deben tenerse en cuenta cuatro factores de rendimiento en particular:

- Afinidad: Describe la tendencia a absorber determinados contaminantes. En el caso de los PFAS, debe absorberse con la misma eficacia un amplio espectro de compuestos individuales.
- Cinética: La cinética del sorbente es importante para conseguir una reducción efectiva de las concentraciones de contaminantes en los caudales naturales de lixiviados.
- Capacidad: Para aplicaciones con un flujo de contaminantes limitado en el tiempo, como los vertederos descubiertos, la capacidad debe ser superior al producto de una concentración de lixiviados determinada, la cantidad anual de lixiviados aumentado por un factor de seguridad adecuado.
- Irreversibilidad: Excluye la desorción retardada y, por tanto, permite el uso permanente de sorbentes.

5 – DISEÑO DE UN FILTRO DE PFAS PARA LIXIVIADOS DE VERTEDERO

5.1 – Configuración de la capa de tratamiento

Un reto importante en el diseño de GCF para vertederos es, sin duda, que en la fase de diseño no se dispone habitualmente de información sobre el residuo con el que se va a rellenar, o ésta es muy escasa. En consecuencia, se desconoce la concentración de entrada y debe estimarse teniendo en cuenta un factor de seguridad adecuado. Dado que el GCF filtra el lixiviado, debe estimarse la cantidad soluble de PFAS que alimentará el filtro durante y después del funcionamiento del vertedero. Una vez instalada la impermeabilización de la cubierta, el volumen de lixiviado se reducirá considerablemente y, en un momento dado, debería llegar a cero. Por lo tanto, para el cálculo de la capacidad, el relleno de un vertedero puede considerarse una fuente limitada en el tiempo para el filtro. Los resultados de las pruebas sobre la capacidad de un GCF proporcionan estimaciones reveladoras de la eficacia y durabilidad del geocompuesto para mitigar la contaminación por PFAS. La isócrona de capacidad que aparece en la Figura 5 se deriva de manera conservadora a partir de varias mediciones de laboratorio y de campo con un GCF para la filtración de PFAS. La isócrona tiene en cuenta una precipitación anual de 800 mm/año y un factor de seguridad de 4. En otras palabras, se asume que solo el 25% de la capacidad total está disponible para la captación de PFAS. Este es un valor conservador que se utiliza con éxito en el cálculo de la vida útil en sistemas de bombeo y tratamiento cuando se desconoce la composición química del contenido orgánico disuelto. Esto asegura que se alcancen los valores objetivo, incluso si otras sustancias orgánicas consumen parte de la capacidad del geocompuesto.

Como valor de entrada para el cálculo de la vida útil, debe conocerse o estimarse la concentración de lixiviado. Sin embargo, en un vertedero acabarán apareciendo residuos con concentraciones variables, desde moderadas a muy contaminadas. Por lo tanto, debe estimarse una concentración media de lixiviados y el operador del vertedero puede establecer una concentración máxima. Básicamente, no es necesario limitar la concentración ni excluir determinados tipos de residuos como suelos contaminados de emplazamientos con antecedentes especiales. Sin embargo, estos son los criterios de aceptación que el gestor de un vertedero puede solicitar y controlar. Para minimizar los riesgos de una posible pérdida de la función de tratamiento del GCF, se puede hacer equilibrio de residuos de concentración más alta y moderada con una distribución granulométrica más fina y gruesa. El uso del lugar de procedencia de un suelo contaminado da pistas sobre los co-contaminantes. El terreno de un aeropuerto puede no contener muchos otros co-contaminantes, mientras que el de un antiguo emplazamiento galvánico puede contener varios metales. También en este caso debe intentarse conseguir un buen equilibrio de los suelos rellenados. Dividir la superficie de la celda en diferentes zonas puede mejorar aún más la gestión y la asignación de los suelos. No obstante, se trata de una recomendación para optimizar el sistema y, en consecuencia, optimizar la capa de material de tratamiento del GCF. Si esta gestión controlada del residuo no es posible, siempre se puede utilizar una capa de relleno más gruesa.

Para mostrar un ejemplo de la estimación de la vida útil de un GCL, se podría considerar una concentración media de lixiviados comprendida en un rango de 100 a 1000 µg/l. Si se toma por ejemplo un valor promedio de 200 µg/l, la vida útil del GCF de 3.000 g/m² estimada es de más de 13 años. Como resultado, el vertedero podría funcionar durante unos 6 años y aún tendría margen de 7 años para instalar el sellado de la cobertura y considerar algunos años de filtrado de lixiviados tras el cierre. No obstante, esto es sólo un ejemplo con 2000 g/m² y 3000 g/m² de material corrector. El peso de estos puede aumentarse si es necesario, lo que permite un diseño flexible del sistema de revestimiento adsorbente del vertedero (Niewerth, S. et al., 2022).

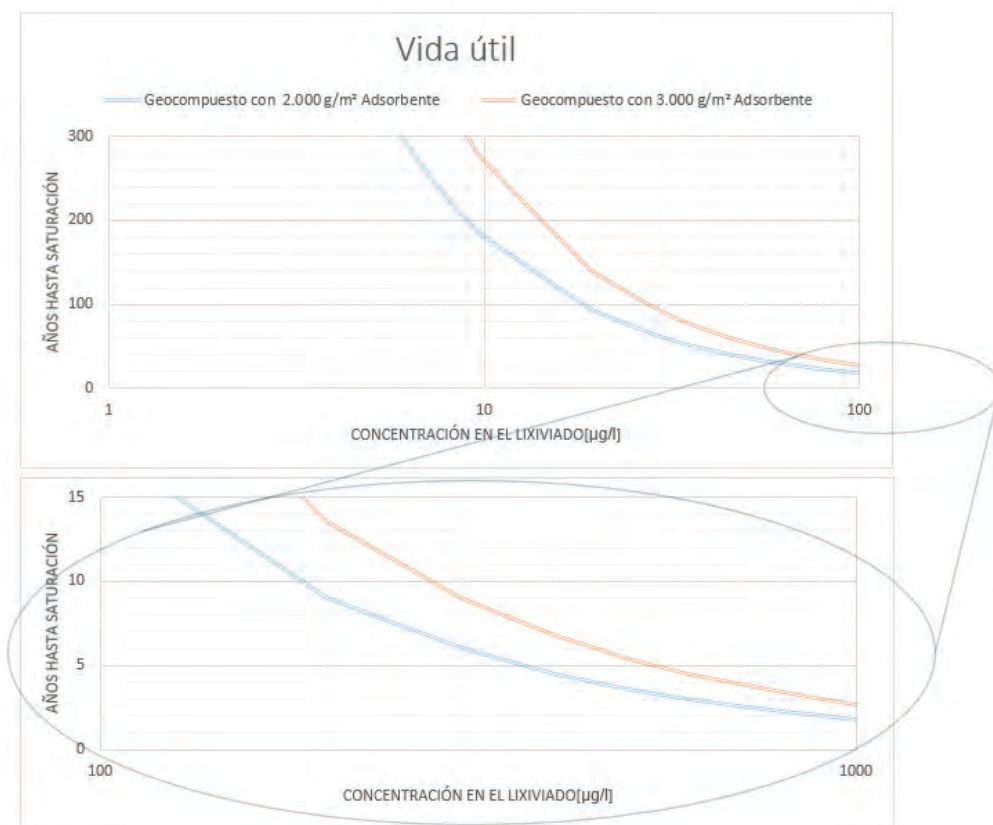


Fig. 5 – Estimación de vida útil para un filtro GCF HUESKER Synthetic GmbH.

5.2 – Configuración del geotextil de base y de la capa de cobertura

Además de los beneficios de las diferentes materias correctoras, la interacción del lixiviado con los geotextiles también es importante para la durabilidad del producto. Los sólidos en suspensión, las partículas finas o los contaminantes de mayor tamaño en el lixiviado provocan la obstrucción del filtro geotextil y son problemáticos para las enmiendas. Dado que estas partículas finas están siempre presentes en el lixiviado del residuo, es imperativo evitar que las partículas finas obstruyan el GCF y dificulten el acceso a la superficie funcional del medio o a los poros, para llevar a cabo con éxito la filtración. Por lo tanto, se requieren geotextiles no tejidos adecuados con un tamaño de apertura definido para su uso a largo plazo. En general, la estabilidad filtrante de los geotextiles no tejidos es crucial para mantener la integridad y longevidad del sistema de contención. Los geotextiles no tejidos se utilizan principalmente como capas de filtración y separación entre el suelo y los materiales de drenaje, evitando que las partículas finas migren a las capas de drenaje y obstruyan el sistema. La estabilidad de estos filtros garantiza una gestión adecuada de los lixiviados, ya que las capas de drenaje obstruidas pueden provocar un aumento de la presión hidráulica, comprometiendo potencialmente la geomembrana y otras capas de sellado. Para garantizar la estabilidad del filtro, el GCF debe tener una permeabilidad adecuada y una distribución del tamaño de los poros que permita el paso de los fluidos al tiempo que retiene las partículas del suelo. Esto ayuda a mantener la

capacidad de flujo del sistema de drenaje y evita el asentamiento o hundimiento a largo plazo dentro del vertedero.

La durabilidad de los materiales es también importante. Como se ha mencionado con anterioridad, se pueden realizar estimaciones de vida útil con pruebas de oxidación *in situ*. Se puede esperar una vida útil de más de 100 años para geotextiles fabricados con calidad y que hayan sido correctamente instalados, expuestos a niveles de pH comprendidos en un rango de 4 a 9 y temperaturas entre 5 y 25°C.

5.3 – Área dedicada para suelos con PFAS

Para que un operador de vertederos esté en condiciones de aceptar tierra contaminada con PFAS, no es necesario que todo el vertedero esté equipado con un GCF. Por lo general, solo es necesario equipar un área específica con un sistema de revestimiento adsorbente. La ventaja principal de esta zona específica es que se minimiza el número de co-contaminaciones. Además, se puede realizar un mejor control de DOC y de otros compuestos potenciales que disminuyen la capacidad de los GCF. Para separar un área del resto del vertedero, se pueden apilar terraplenes directamente sobre el sellado de la base existente. Esta zona puede revestirse fácilmente con un GCF. Dado que lo más probable es que la permeabilidad del material sea mayor que la del suelo de cobertura, no es necesario realizar sellados solapados ni soldaduras. El agua percolará perpendicularmente a través de los geocompuestos y no tomará el camino más largo y difícil a través de los solapes sin estar en contacto con las enmiendas. Así, los rollos pueden instalarse con un solape de 25 cm sin ninguna medida adicional. Dado que los rayos UV son siempre perniciosos para los geotextiles no tejidos, se recomienda que la primera capa de tierra de cobertura se instale en el plazo de unas semanas.

6 – PRUEBAS EN LABORATORIO Y CAMPO

La eficacia de Tektoseal Active PFAS 2000 AI (WB) ya se ha documentado en varios proyectos. A continuación, se resumen de forma ilustrativa los resultados de un estudio de laboratorio y de una prueba de campo. En un equipo que permite simular una columna de suelo, se permitió que las aguas subterráneas contaminadas con PFAS fluyeran a través del GCF a velocidades de filtración naturales durante un período de tiempo prolongado. Extrapolado a la realidad, esto da como resultado un volumen representativo de lixiviado que representa un período de aproximadamente 10 años (Beims, U. y Gutt, B., 2002). Transcurrido este plazo, la eficacia sigue siendo elevada, como puede verse en la Tabla 2. Según el método de cálculo de Beims/Gutt, la cantidad de lixiviado producida puede estimarse en función de las precipitaciones anuales, el tipo de suelo y la vegetación. En el ejemplo de cálculo, se supone una precipitación de 820 mm/a, arena limosa y terreno sin vegetación.

Esto demuestra que claramente no se ha alcanzado aún el límite de capacidad. Mediante un cálculo de balance de masas se llega al resultado de que sólo se ha alcanzado el 5% de la capacidad teórica tras 10 años representativos de percolación con la concentración dada. Por tanto, se deduce el GCF puede utilizarse durante mucho tiempo con estas bajas concentraciones.

Tabla 2 – Resumen de datos de pruebas de flujo en laboratorio con aguas subterráneas contaminadas para diferentes tipos de PFAS.

	PFBA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFBS	PFPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	H4PFOS
IC (µg/l)	0,20	1,00	1,20	0,33	1,00	0,29	0,29	3,30	0,09	1,90	0,63
E (%)	89%	93%	94%	95%	96%	95%	95%	96%	95%	97%	98%

IC: Concentración inicial [µg/l]

E: Efectividad tras 10 años representativos [%]

Adicionalmente, en la Tabla 3 se presentan los resultados de un terreno altamente contaminado. En este proyecto piloto, se aplicó al suelo altamente contaminado el geocompuesto Tektoseal Active PFAS 2000 AI (WB) y se regó adicionalmente con agua subterránea contaminada durante varias semanas.

Tabla 3 – Resumen de datos de pruebas a escala real con suelos y aguas subterráneas altamente contaminados para diferentes tipos de PFAS.

	PFBA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFBS	PFPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	6:2FTS	Suma de PFAS
IC (µg/l)	1,3	2,3	4,2	0,9	5,7	1,5	1,0	7,1	0,7	14,0	0,1	65,0
E (%)	90,8%	99,3%	99,7%	100%	99,7%	100%	100%	99,8%	100%	98,9%	100%	99,7%

IC: Concentración inicial [µg/l]
E: Eficacia tras 1,75 años representativos [%]

Además de los compuestos individuales, en la Tabla 4 se indica la eficacia frente a la suma de PFAS. Transcurridos 21 meses, la eficacia sigue siendo elevada. En general, durante todo el período de prueba se midió una fuerte disminución de la concentración en el flujo de salida. En un análisis se observó un descenso del rendimiento después de 10 meses representativos. El motivo fueron problemas con la estructura del proyecto, más concretamente fugas en las paredes laterales. Sin embargo, incluso con grandes volúmenes de agua en poco tiempo el rendimiento fue satisfactorio. Sobre la base de todos los análisis realizados hasta la fecha, cabe suponer que la captación de PFAS es muy eficaz con el GCF descrito en este documento.

Tabla 4 – Resumen de datos de pruebas a escala real con suelos y aguas subterráneas altamente contaminados para diferente tiempo representativo para el total de PFAS.

Tiempo representativo [meses]	7	10	14	17	18	19	20	21
IC total PFAS (µg/l)	40	67	51	58	54	58	66	65
E total PFAS (%)	98,6%	82,1%	97,8%	98,9%	99,0%	99,4%	99,6%	99,7%

IC: Concentración inicial [µg/l]
E: Eficacia a lo largo del tiempo [%]

7 – CONSIDERACIONES FINALES

Los PFAS, ahora incluidos en el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes, plantean importantes retos para la gestión de vertederos debido a su persistencia y movilidad. Los revestimientos compuestos convencionales, aunque de uso común, pueden no impedir totalmente la migración de PFAS, lo que pone de relieve la necesidad de estrategias de contención más eficaces. Este estudio demuestra que los filtros geosintéticos de contaminantes (GCF) proporcionan una solución mejorada para la retención de PFAS. Tanto los ensayos de laboratorio como los de campo confirman que los GCF absorben eficazmente los PFAS, reduciendo su movilidad en los vertederos y limitando la contaminación por lixiviados. Dada la creciente preocupación normativa por la gestión de los PFAS, la incorporación de los GCF a los diseños de vertederos podría ofrecer un método práctico para mejorar la contención a largo plazo. Los resultados sugieren que este enfoque puede mitigar los riesgos asociados a los lixiviados de PFAS, contribuyendo a unas operaciones de vertido más seguras y sostenibles.

8 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials. (2020). ASTM F739-20: Standard test method for permeation of liquids and gases through protective clothing materials under conditions of continuous contact. ASTM International.
- Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). (2015). UNE-EN ISO 10318-1:2015 Geosintéticos. Parte 1: Términos y definiciones (ISO 10318-1:2015). AENOR.
- Beims, U.; Gutt, B. (2002). *Entwicklung eines rationellen Verfahrens zur Bewertung von Bodenkontaminationen und deren Exposition (EXPOSI): Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben*. Dresden.
- Bonaparte, R.; Daniel, D.; Koerner, R. M. (2002). *Assessment and recommendations for improving the performance of waste containment systems*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Chao, K.-P.; Wang, P.; Lin, C.-H. (2006). *Estimation of diffusion coefficients and solubilities for organic solvents permeation through high-density polyethylene geomembrane*. Journal of Environmental Engineering, 132(5), pp. 519–526. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2006\)132:5\(519\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:5(519))
- Di Battista, V.; Rowe, R. K.; Patch, D.; Weber, K. (2020). *PFOA and PFOS diffusion through LLDPE and LLDPE coextruded with EVOH at 22 °C, 35 °C, and 50 °C*. Waste Management, 117, pp. 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.009>
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. (2000). Diario Oficial de la Unión Europea, L 327, pp. 1–73.
- Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de diciembre de 2006, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro. (2006). Diario Oficial de la Unión Europea, L 372, pp. 19–31.
- Fuertes, I.; Gómez-Lavín, S.; Elizalde, M. P.; Urtiaga, A. (2017). *Perfluorinated alkyl substances (PFASs) in northern Spain municipal solid waste landfill leachates*. Chemosphere, 168, pp. 399–407. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.075>
- Giroud, J. P.; Bonaparte, R. (1989). *Leakage through liners constructed with geomembranes — Part I. Geomembrane liners*. Geotextiles and Geomembranes, 8(1), pp. 27–67. [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(89\)90033-9](https://doi.org/10.1016/0266-1144(89)90033-9)
- Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. (2022). Boletín Oficial del Estado, núm. 85, pp. 1–76.
- Niewerth, S. (2021). *Permeable contaminant barrier for soil and groundwater protection as well as site remediation*. Bauingenieur, 96(11), pp. 476–478.
- Niewerth, S. (2021a). *Landscaping with PFAS contaminated soil and thin permeable barriers*. En Proceedings of the 12th International SedNet Conference. Lisbon, Portugal.
- Niewerth, S.; Carbone, L.; Lassing, H. (2022). *Containment and passive decontamination of PFAS soil in technical structures by means of sorption mats*. En Proceedings of Recy & DepoTech Conference 2022. Leoben, Austria.
- Pickin, J.; Wardle, C.; O’Farrell, K.; Stovell, L.; Nyunt, P.; Guazzo, S.; Lin, Y.; Caggiati-Shortell, G.; Chakma, P.; Edwards, C.; Lindley, B.; Solutions, C.; Latimer, G.; Waste, A. (2022).

National waste report 2022. Blue Environment & Australian Government, Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water.

Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. (2020). Boletín Oficial del Estado, núm. 182, pp. 1–36.

Safe Drinking Water Act, Pub. L. No. 93-523, 88 Stat. 1660 (1974).

Tan, Y.; Benson, C. H. (2023). *Effectiveness of composite liners in containing PFAS*. En Proceedings of WM2023 Conference. Phoenix, AZ, USA.

Toxic Substances Control Act, as amended by the Frank R. Lautenberg Chemical Safety for the 21st Century Act, Pub. L. No. 114-182, 130 Stat. 448 (2016).

IMPACTE DO MODO DE CORTE CÍCLICO NO COMPORTAMENTO DE AMOSTRAS RECONSTITUÍDAS DE REJEITADOS DE VOLFRÂMIO

Impact of cyclic shear mode on the behaviour of reconstituted tailings samples

João Pedro Oliveira^a, Luis Araújo Santos^{b,c}, Paulo Coelho^{a,d}

^a Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal.

^b Instituto Politécnico de Coimbra, Portugal.

^c Núcleo de Investigação em Sustentabilidade, Cidades e Inteligência Urbana (SUScita), Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Portugal.

^d Centro de Investigação do Território, Transporte e Ambiente (Citta), Universidade de Coimbra, Portugal.

RESUMO – O efeito do modo de carregamento na resposta de rejeitados de mineração de volfrâmio em condições não drenadas é ainda pouco conhecido. De facto, muitos ensaios são realizados em laboratório com recurso a equipamento triaxial, que não reproduz as ações de corte mobilizadas in situ. O presente trabalho aborda esta questão comparando a resposta não drenada de rejeitados de minério de tungsténio sob ações monotónicas e cíclicas de compressão/extensão e de torção simples impostas numa célula triaxial e num *Hollow Cylinder Apparatus*, respetivamente. Após se apresentarem as especificidades da preparação de amostras de rejeitados pelo método da deposição de lama, comparam-se as respostas no domínio das pequenas e grandes deformações. A influência do tipo e modo de carregamento é significativa na geração de pressões intersticiais, atribuindo-se as diferenças ao efeito da tensão principal intermédia. A influência do fator da tensão principal intermédia é igualmente visível na degradação do módulo de rigidez de corte secante com a deformação.

ABSTRACT – The impact of loading mode on the response of wolfram mine tailings under undrained conditions remains poorly understood. Many laboratory tests use triaxial equipment that cannot replicate the shear actions experienced in situ. This paper tackles this issue by comparing the undrained responses of tungsten mine tailings under monotonic and cyclic compression/extension, as well as simple torsion, applied in a triaxial cell and a *Hollow Cylinder Apparatus*, respectively. It discusses the preparation of tailings samples via the slurry deposition method and compares their responses in both small and large deformation ranges. The type and mode of loading significantly influence pore pressure development, mainly due to the effects of the intermediate principal stress. This intermediate stress also impacts the degradation of the secant stiffness modulus with strain.

Palavras-chave – rejeitados da mineração de volfrâmio, *Hollow Cylinder Apparatus* (HCA), modo de corte, módulo de rigidez de corte.

Keywords – wolfram mine tailings, *Hollow Cylinder Apparatus* (HCA), shear mode, shear stiffness

E-mails: joaopsvo@uc.pt (J. Oliveira), lmsantos@isec.pt (L. Santos), pac@dec.uc.pt (P. Coelho)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0825-1651> (J. Oliveira), <https://orcid.org/0000-0001-6078-0393> (L. Santos), <https://orcid.org/0000-0002-0945-3175> (P. Coelho)

1 – INTRODUÇÃO

O objetivo de criar uma sociedade sustentável com a implementação de medidas que promovam o desenvolvimento de tecnologias renováveis, os investimentos em projetos sustentáveis e a aplicação de modelos de economia circular, implicará inevitavelmente o consumo de mais minerais e metais. Segundo os dados apresentados por USAID (2021), onde são apresentados dois cenários possíveis, o consumo de minerais e metais até 2040 deverá ascender a duas até quatro vezes mais do que aqueles que são consumidos atualmente. Além disso, a indústria mineira produz enormes volumes de rejeitados provenientes da sua atividade. Com o aumento expectável da exploração mineira, para fazer face à necessidade da produção de mais minerais e metais, estes volumes de rejeitados irão necessariamente aumentar. Estes rejeitados são normalmente depositados em estruturas de armazenamento de rejeitados, cuja gestão envolve desafios complexos. Em caso de rotura de uma barragem de rejeitados, poderão ocorrer enormes desastres ambientais e sociais. A Figura 1 apresenta as principais causas de falhas de barragens de rejeitados em todo o mundo, onde se observa que, para além do número relativamente reduzido de roturas na Europa, de entre as causas conhecidas, os fenómenos de liquefação sísmica surgem na segunda posição.

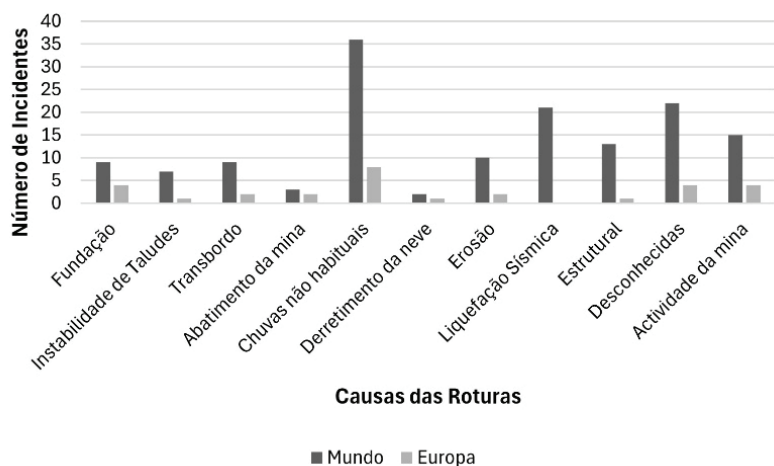


Fig. 1 – Distribuição do número de incidentes em barragens de rejeitados de acordo com a causa no mundo e na Europa (adaptado de Rico et al., 2007).

Os ensaios laboratoriais são uma forma de estabelecer o comportamento dos rejeitados sob ações cíclicas, que podem fornecer uma base para revelar o mecanismo de instabilidade sísmica das barragens de rejeitados. Uma vez que o período de construção de uma barragem de rejeitados se pode prolongar por dezenas de anos e a sua vida útil será muito superior, a sua exposição a ações sísmicas é muito significativa, mesmo em regiões com atividade sísmica pouco frequente. A avaliação dos efeitos dos sismos em barragens de rejeitados é complexa, até porque as alterações na natureza dos rejeitos causadas pelo sismo anterior afetam o seu desempenho em sismos subsequentes. Por exemplo, a barragem de rejeitados de Kayakari, em Kayakari, no Japão, não sofreu danos no grande sismo de 2003, mas, num pequeno sismo subsequente, em 2011, a barragem rompeu por liquefação (Wang et al., 2021).

O presente trabalho pretende avaliar a resposta do efeito de vários modos e tipos de ações em rejeitados de minério de volfrâmio, através da utilização do *Hollow Cylinder Apparatus* (HCA) e de células de trajetórias de tensões.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A liquefação induzida por sismos é considerada um dos tópicos mais relevantes, complexos e controversos na Engenharia Sísmica Geotécnica (Kramer, 1996). De forma simplificada, pode ser definida como o surgimento de elevadas pressões intersticiais da água nos poros geradas por ações cíclicas que conduzem à anulação das tensões efetivas no solo. Existem dois fenómenos distintos associados à liquefação, ambos desencadeados por ações cíclicas: a liquefação por fluxo e a mobilidade cíclica.

A liquefação por fluxo ocorre com menor frequência do que a mobilidade cíclica, mas os seus efeitos tendem a ser mais devastadores (Kramer, 1996). Este fenómeno traduz-se numa rápida transformação do solo, que inicialmente se comporta como um sólido e passa a comportar-se quase como um líquido, devido ao desenvolvimento de excessos de pressão intersticial positivos. Um exemplo notável deste tipo de instabilidade ocorreu no colapso da barragem de rejeitados de ferro de Córrego do Feijão, em Brumadinho, no Brasil (Robertson et al., 2019).

Por sua vez, a mobilidade cíclica manifesta-se quando a tensão de corte estática imposta é inferior à resistência ao corte do solo liquefeito. As deformações desenvolvem-se ao longo de toda a atividade sísmica e podem ser induzidas tanto por tensões de corte cíclicas como estáticas. Segundo Kramer (1996), a liquefação em terrenos horizontais pode ser entendida como um caso particular de mobilidade cíclica, já que a ausência de tensões de corte estáticas horizontais impede deformações laterais significativas. Nestes casos, a liquefação superficial pode provocar oscilações acentuadas do terreno durante um abalo sísmico.

Do ponto de vista experimental, vários estudos laboratoriais permitiram identificar aspetos característicos do comportamento cíclico dos solos. Seed e Lee (1965) verificaram que o desenvolvimento de deformações significativas apenas se manifesta quando a trajetória de tensões cruza a Linha de Transformação de Fase (LTF). De facto, a fase de descarga é responsável por acréscimos adicionais de pressão intersticial (Chern, 1985). Observou-se ainda que, no primeiro ciclo de carregamento, a redução da tensão efetiva é mais acentuada do que nos ciclos seguintes. Neste estágio inicial, as trajetórias de tensão localizam-se predominantemente na zona contrativa. À medida que estas evoluem e cruzam a LTF, o comportamento do solo passa para a zona dilatante, o que está associado a incrementos adicionais de pressão intersticial mais significativos (Luong e Sidaner, 1981).

Ensaio triaxiais cíclicos não drenados em rejeitados têm igualmente demonstrado a importância destas características. Em amostras reconstituídas de rejeitados da barragem de El Torito, no Chile, consolidada isotropicamente, verificou-se que a trajetória de tensões efetivas se desloca progressivamente para a esquerda durante a carga cíclica, acompanhada por aumentos de pressão de poros e pelo desenvolvimento de deformações permanentes. Com a progressão dos ciclos, a trajetória de tensões aproxima-se da envolvente de rotura e o material pode entrar em regime de oscilações entre compressão e extensão, chegando mesmo a condições próximas de $p'=0$ (Solans et al., 2019). Coelho e Camacho (2024) mostram que a presença da LTF tem efeitos qualitativamente semelhantes em rejeitos de ferro e em solos no que respeita à forma dos caminhos de tensões efeitos observados nos ensaios triaxiais cíclicos não drenados à medida que as tensões efetivas nas amostras se reduzem.

Suazo et al. (2016) realizaram ensaios triaxiais cíclicos em rejeitados de uma mina de zinco, preparados pelo método de deposição de lamelas. Os resultados mostraram que, sob carregamento cíclico, o rejeitado apresentou curvas de histerese características desse tipo de comportamento em solos. Observou-se ainda a ocorrência de liquefação por mobilidade cíclica, evidenciada pelo aumento progressivo da pressão de poros à medida que os ciclos de carga avançavam. Consequentemente, a distorção acumulada na amostra também aumentou com o número de ciclos aplicados, sobretudo nas zonas próximas da liquefação (Suazo et al., 2016).

A compreensão completa do comportamento de rejeitados de mineração requer, igualmente, o conhecimento da resposta deste material no domínio das pequenas deformações. Embora os

acidentes graves que ocorreram no passado foquem o estado limite último, a caracterização do estado limite de utilização é fundamental numa perspetiva de sustentabilidade, ao objetivar-se a valorização deste resíduo em obras geotécnicas. Para níveis de deformação muito baixos, até 0,1% (Burland, 1989), o comportamento de geomateriais é governado pelos seus parâmetros de rigidez. A rigidez inicial caracteriza o comportamento elástico do material, podendo a resposta do material ser prevista pela Lei de Hooke (Gasparre, 2005). Com o aumento das deformações, a rigidez decai e são ainda geradas deformações irreversíveis. A degradação da rigidez com o aumento das deformações segue uma curva em forma de S invertido, como representado na Figura 2. Contrariamente à rigidez inicial, que requer instrumentação local ou outros tipos de equipamentos, a degradação da rigidez pode ser estudada com equipamentos convencionais. Por último, vários estudos já concluíram que a rigidez relativa a pequenas deformações pode influenciar os processos de iniciação de liquefação (dos Santos et al, 2025; Schnaid et al, 2013). Nesse sentido, importa avaliar o impacto que os modos de corte têm na resposta de rejeitados de mineração a diferentes níveis de deformação.

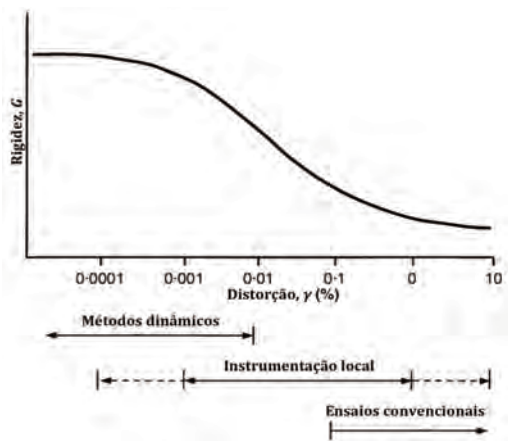


Fig. 2 – Curva típica de degradação da rigidez de corte em função da deformação (adaptado de Atkinson, 2000).

3 – MATERIAL E EQUIPAMENTO

3.1 – Rejeitados da mineração de volfrâmio

O material utilizado neste trabalho foi recolhido na mina nacional da Panasqueira, em Portugal, e serviu unicamente como exemplo de um rejeitado da mineração. Os rejeitados são provenientes desta mina subterrânea que se situa no centro-norte de Portugal, integrando os concelhos da Covilhã e do Fundão, no distrito de Castelo Branco, e Pampilhosa da Serra (distrito de Coimbra), tratando-se de uma mina que explora essencialmente tungsténio (Figura 3). São igualmente extraídas nesta mina pequenas quantidades de cobre (Antunes, 2010). A composição mineralógica dos rejeitos da mina é muito diversificada, refletindo a complexidade da sua paragénesese. Os principais minerais incluem óxidos e silicatos como o quartzo, a volframite e a cassiterite. Existe também uma quantidade significativa de sulfuretos, como a pirite, a calcopirite, a arsenopirite, a pirrotite e a blenda (Antunes, 2010; Simão, 2017). Estes minerais não só refletem a evolução hidrotermal da mina, como também influenciam diretamente a estabilidade e a gestão dos rejeitos. Importa referir que os rejeitados recolhidos são representativos do material depositado numa das barragens de rejeitados da mina, não existindo quaisquer registos ou indícios de incidentes nas estruturas de armazenamento desta mina.



Fig. 3 – Vista satélite da barragem de rejeitados da mina da Panasqueira e sua localização em Portugal.

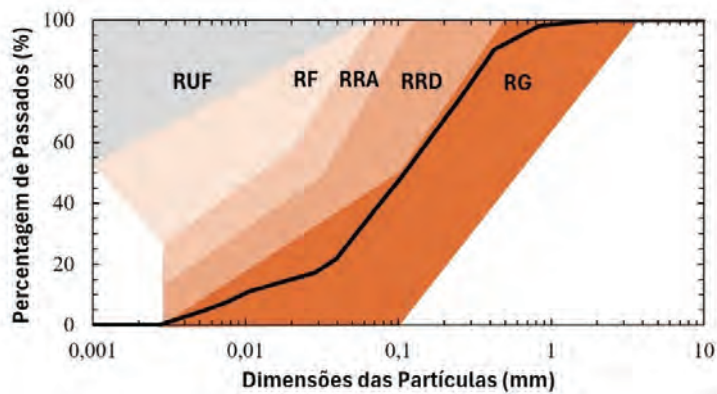
A caracterização inicial do material compreendeu a determinação da densidade das partículas sólidas, dos limites de consistência e da granulometria do material em estudo. A determinação destes parâmetros seguiu o especificado nas normas portuguesas e britânicas, respetivamente, a NP 83 (LNEC, 1965), a BS 1377 (British Standard, 1975) bem como a NP 143 (LNEC, 1969) e, por fim, a E 196 (LNEC, 1966). O Quadro 1 resume os resultados destes ensaios de identificação. A densidade das partículas sólidas (G) enquadra-se na variação de valores propostos para os rejeitos de minas por Fourie et al. (2021) e Hu et al. (2016), sendo o valor mais elevado do que o normalmente encontrado em solos naturais, devido à presença de diferentes metais e minerais nos rejeitos. O índice de vazios *in situ* (e_0) varia entre 0,62 e 0,75, como observado por Oliveira et al. (2024a). Por depender do processo de deposição, este parâmetro não pode ser diretamente comparado com outros resultados. Porém, ele está de acordo com os resultados publicados por Rodríguez et al. (2021).

A determinação dos limites de consistência, nomeadamente o limite de liquidez (w_L) e limite de plasticidade (w_P), também forneceu resultados semelhantes aos propostos para outros rejeitados de mineração, nomeadamente cobre (Hu et al., 2016), ouro (Islam, 2021), prata, zinco e chumbo (Malekzadeh et al., 2015). Tomando como referência os rejeitados de mineração de ferro, cujo processo de extração inclui, tal como para o volfrâmio, fases de trituração, moagem e separação por gravidade, verifica-se que os valores obtidos para o limite de liquidez e o limite de plasticidade enquadram-se, respetivamente, nos intervalos [4 – 60] e [9,3 – 32,4] que resultam das compilações apresentadas por Macedo e Vergaray (2022) e Carneiro et al. (2023). A análise granulométrica efetuada revela que os rejeitos da Panasqueira são compostos por 16% de argila, 73% de silte e 11% de areia, sendo a curva granulométrica obtida apresentada na Figura 4. Com base na norma D 2487-06 (ASTM, 2006), este material é classificado como areia argilosa (SC), corroborando a sugestão

de Witte et al (2017) de que os rejeitos de mina podem ser vistos como solos de transição entre areias e argilas, com diferentes densidades e, conseqüentemente, diferentes propriedades mecânicas. Por se tratarem de geomateriais não convencionais, Witte et al. (2017) apresentaram uma classificação alternativa baseada na distribuição de tamanhos, considerando alguns fatores que influenciam as características dos rejeitos de minas. Segundo esta proposta, os rejeitos da mina da Panasqueira classificam-se como rejeitos granulares, assemelhando-se a areias siltosas não plásticas.

Quadro 1 – Resultados dos ensaios de identificação.

Índices físicos		Caraterísticas granulométricas				Caraterísticas de plasticidade		
G (-)	e (-)	D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	C _u (-)	C _c (-)	W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)
3,15	0,62-0,75	0,01-0,014	≈ 0,12	10,7-17,5	1,78-1,88	23,3	14,7	8,6



RG: Rejeitados Grosseiros; RRD: Rejeitados de rocha dura; RRA: Rejeitados de rocha alterada; RF: Rejeitados Finos; RUF: Rejeitados ultrafinos.

Fig. 4 – Curva granulométrica dos rejeitados em estudo representada em simultâneo com a classificação apresentada por Witte et al (2017).

3.2 – Célula de trajetória de tensões

Os ensaios triaxiais monotónico e cíclico foram realizados numa célula de trajetória de tensões hidráulica do tipo Bishop e Wesley (1975) que permite ensaiar amostras com 38 mm de diâmetro e 76 mm de altura até tensões máximas de 1000 kPa. A amostra de solo repousa sobre o pedestal, que está ligado ao veio do equipamento, podendo ser acoplada à célula de carga através de um topo de ligação em borracha à placa de topo da amostra, através da aplicação de sucção. Esta ligação é obrigatória aquando da realização de ensaios cíclicos que envolvam extensão, mesmo que temporária, e recomendada em ensaios de compressão monotónica para reduzir erros de ajustes iniciais. O pedestal pode deslocar-se verticalmente nos dois sentidos, sendo controlado ou por uma interface ar/água ou por atuadores do tipo CRSP (*Constant Rate of Strain Pump*). A contrapressão e a pressão na câmara são controladas por um medidor volumétrico e uma interface ar-água, respetivamente. A pressão nestes equipamentos é fornecida por um sistema de ar comprimido e controlada por controladores de pressão de regulação automática. As pressões de serviço máximas destes controladores são aproximadamente 800 kPa. Informações mais detalhadas sobre o funcionamento destes equipamentos podem ser encontradas em Venda Oliveira (1992).

3.3 – *Hollow Cylinder Apparatus* da Universidade de Coimbra

O equipamento de ensaios sobre cilindros ocos, comumente designado por HCA, foi inicialmente desenvolvido para permitir uma melhor simulação das trajetórias de tensões experimentadas por fundações offshore, usualmente submetidas a estados de tensão em que as três tensões principais são diferentes, sendo acompanhados de rotação da direção das tensões (Symes, 1983). Desde as suas primeiras configurações, os equipamentos laboratoriais evoluíram, tendo o equipamento da Universidade de Coimbra sido desenvolvido e construído no Imperial College London com a designação de HCA Mark II. Tal como é descrito em Viana da Fonseca et al. (2021), este equipamento permite ensaiar amostras de secção oca com duas geometrias: i) amostras pequenas com 60 mm diâmetro interno (D_i), 100 mm de diâmetro externo (D_o) e 200 mm de altura (H); ii) amostras grandes com 150 mm diâmetro interno, 200 mm de diâmetro externo e 300 mm de altura. Além de amostras de secção oca, o equipamento pode ensaiar amostras cilíndricas convencionais, de secção cheia, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, bastando, para este efeito, trocar as placas rígidas das extremidades das amostras. Na Figura 4a ilustra-se esquematicamente o equipamento da Universidade de Coimbra.

O princípio básico de funcionamento do HCA baseia-se na combinação independente dos esforços/pressões: uma carga axial, momento torsor, pressão interna, pressão externa e contrapressão numa amostra cilíndrica oca. As pressões de confinamento interna (na cavidade interna) e externa (em redor da parede exterior da amostra) são aplicadas pela água através de interfaces ar água ou de atuadores do tipo CRSP. A contrapressão é aplicada por via de um medidor volumétrico enquanto as cargas axial e de torção são aplicadas e controladas por dois conjuntos de atuadores, instalados numa plataforma de transferência no inferior da estrutura do HCA. Os sistemas de atuadores estão conectados ao eixo de carregamento do equipamento. O esforço e a deformação axiais são induzidos pelo atuador P_1 ao eixo central do equipamento. Um atuador P_4 (que não é representado na Figura 4a, que está constantemente sob pressão, garante que a plataforma de transferência desce quando trajetórias de extensão são aplicadas a amostra. Na plataforma móvel de transferência estão igualmente colocados mais dois atuadores (P_2 e P_3) ligados ao veio central através dum sistema de corrente e rodas dentadas que são responsáveis pela aplicação da torção e, consequentemente, da rotação no plano horizontal. O atuador P_3 , que está sob pressão de ar, funciona como atuador de compensação, garantindo que a corrente está sempre tracionada. Um sistema de rolamentos e o uso de materiais de reduzido atrito permitem a separação dos dois esforços aplicados. A plataforma de transferência, e consequentemente os atuadores P_2 e P_3 , é livre de se movimentar verticalmente devido a um sistema de rolamentos ligados a dois dos quatro pilares da estrutura (Minh, 2006; Araújo Santos, 2015). Todas as linhas de pressão e de aplicação de carga estão ligadas a um quadro de controlo, que permite o controlo manual das pressões ou a verificação das mesmas. O quadro de controlo dispõe igualmente de uma linha de pressão/sucção independente que possibilita, por exemplo, processos de preparação ou saturação de amostras sem equipamentos adicionais.

O controlo e a monitorização dos ensaios utilizam uma vasta gama de instrumentos de medição. Medições locais referem-se a registos de deformações retirados entre dois pontos numa zona central ao longo da parede da amostra ou no seu plano transversal médio. As medições referentes a deslocamentos do topo da amostra relativamente à base ou a variações de volume são designadas por medições globais. Note-se que, a designação de instrumentação interna, frequente em outros equipamentos laboratoriais, não é utilizada no HCA, sendo reservada para as informações referentes à cavidade interna da amostra.

A instrumentação local é constituída por quatro tipos de equipamentos. Um LVDT colocado a meia altura nas paredes internas da amostra mede a deformação radial destas paredes. Um conjunto de três sensores de proximidade, cujo funcionamento se baseia no princípio de impedância entre uma fonte emissora (sensor) e um alvo (folha de alumínio com sensivelmente $9,5 \text{ cm}^2$), mede a deformação radial da parede exterior. Os alvos e os sensores estão distribuídos de forma equidistante

no mesmo plano horizontal a meia altura nas paredes externas, ou seja, estão separados por ângulos de 180°. Dois eletróníveis biaxiais, instalados a meia altura na parede exterior da amostra registam deformações axiais e angulares. O correto funcionamento dos instrumentos requer que sejam instalados em zonas diametralmente opostas da amostra. Embora estes equipamentos permitam o registo das duas deformações, apenas conseguem registar uma de cada vez, requerendo a intervenção do operador para alterar a orientação de leitura. Por fim, um eletrónível uniaxial instalado a meia altura da parede exterior da amostra mede a deformação angular da amostra. Os três eletróníveis são instalados entre os espaços proporcionados pelos sensores de proximidade, garantindo que, em função do ensaio a realizar, não exista interação física entre os vários instrumentos. A Figura 5b ilustra o posicionamento vertical de todos os instrumentos de medição local. Viana da Fonseca et al. (2021) ilustra vários pormenores sobre o processo de calibração da instrumentação interna, estando toda a metodologia detalhadamente descrita em Araújo Santos (2015).

A instrumentação global é constituída por dois transdutores de deslocamento e dois medidores volumétricos. Os deslocamentos axial e angular da amostra são medidos pelos defletómetros instalados sobre a plataforma móvel de transferência. Enquanto o defletómetro axial mede diretamente o movimento vertical do pedestal em que a amostra está instalada, não é possível registar diretamente a rotação do veio central, ao qual está ligado o pedestal que suporta a amostra. De facto, o defletómetro mede a variação do cateto oposto do ângulo ao centro relativo à rotação do veio, através de uma cantoneira aparafusada ao veio central do equipamento. A Figura 5a ilustra o posicionamento dos dois defletómetros.

Por fim, a medição da força axial e do momento torsor e das pressões é realizada através da célula de carga e de transdutores de pressão. A célula de carga combinada regista a força axial, numa gama de valores entre -6 kN e 8 kN, e o momento torsor, de ± 400 Nm. Os quatro transdutores de pressão instalados registam pressões até 1000 kPa nas linhas referentes à contrapressão no topo e da base da amostra, à pressão interna e à pressão externa. A descrição pormenorizada do HCA e de todos os instrumentos de medição, bem como equações de controlo, pode ser consultada em Araújo Santos (2015).

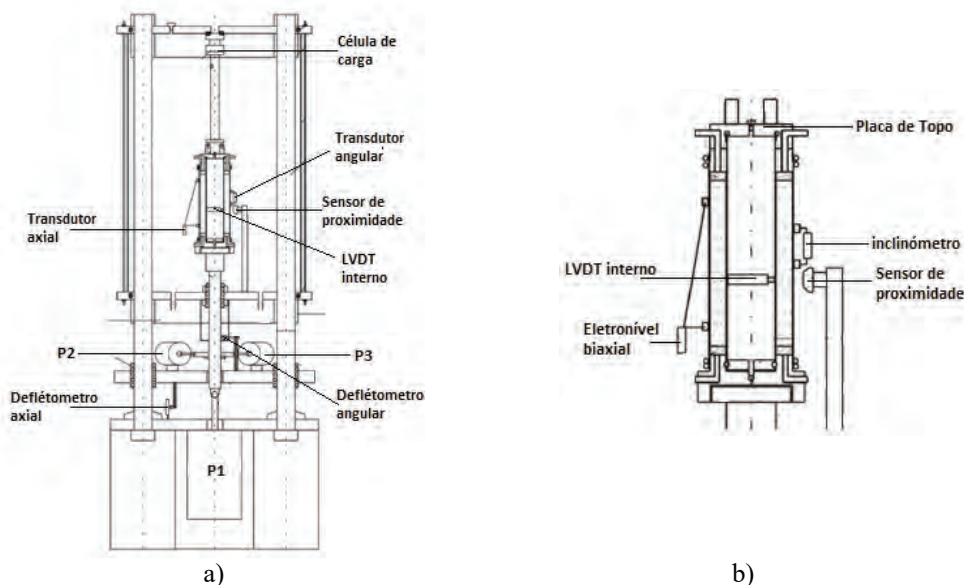


Fig. 5 – Representação esquemática do HCA da Universidade de Coimbra: a) Representação esquemática do equipamento; b) Esquema representativo do sistema de instrumentação local (adaptado de Minh 2006 e Araújo Santos, 2015).

4 – PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS RECONSTITUÍDAS

Para que um trabalho laboratorial que visa o estudo e compreensão da resposta de ações externas de solos ou geomateriais seja bem sucedido, qualquer que seja o equipamento laboratorial utilizado, é necessário obter amostras intactas ou reconstituídas/remoldadas de qualidade. Nesse sentido, e tendo em conta que os rejeitados da mineração são geomateriais não convencionais, a utilização de amostras reconstituídas assume um papel fundamental, desde que estas sejam representativas do comportamento real e produzidas por métodos repetíveis e replicáveis.

Kuerbis et al. (1988) fazem uma revisão de várias técnicas para o fabrico de amostras de materiais granulares e concluem que o método de deposição de lamas é mais apropriado para a simulação de ambientes aquáticos em que a deposição é mais rápida. O método tem sido amplamente reconhecido como capaz de reproduzir condições próximas das observadas em solos aluvionares naturais e, em particular, em rejeitados dispostos em barragens, onde o material é depositado sob a forma de lama. No caso da mina da Panasqueira, a deposição dos rejeitados é realizada em condições subaéreas. Os rejeitados, sob a forma de lama, são encaminhados para a barragem e descarregados através de diversos pontos de deposição (Ávila et al., 2008). Face ao exposto, opta-se por recorrer a esta técnica para a reconstituição de amostras. Contudo, é importante salientar que, atualmente, têm sido implementadas técnicas mais recentes de deposição, como pilhas de rejeitados drenadas, nas quais os rejeitados são previamente filtrados e, em certos casos, compactados.

A preparação do equipamento, assim como a montagem de todos os componentes relativos ao ensaio, segue o procedimento indicado por Araújo Santos (2015), com a exceção da técnica de deposição do material utilizado. Os principais passos da técnica desenvolvida foram adaptados da técnica inicialmente utilizada por Carraro e Prezzi (2008). Mais recentemente, foi proposto um método de deposição de lamas por Dominguez-Quintans et al. (2023) que garante a homogeneidade de amostras de solo não uniforme, como é o caso do geomaterial em estudo. Porém, devido às limitações resultantes da configuração da câmara do HCA, da dificuldade de moldar amostras de secção oca e do peso dos componentes necessários à preparação de amostras, a implementação de processos que exigem algum tipo de movimentação da amostra acarreta riscos consideráveis para o técnico e o equipamento.

Para realizar a mistura dos rejeitados com a quantidade de água pretendida foi desenvolvido um equipamento que permite a mistura mecânica dos rejeitados com a água (Figura 6a). Através da misturadora foi possível realizar a mistura de forma idêntica, promovendo uma mistura bastante homogénea (Figura 6b). O procedimento consiste em colocar na cuba metálica os rejeitados e a quantidade de água pretendida e colocar o agitador mecânico em funcionamento durante cerca de 2 min. De facto, tal como demonstrado por Raposo (2016), o processo de agitação da mistura até ao momento imediatamente antes da deposição é fundamental manter uma mistura uniforme e com quantidades mínimas de ar incorporado. Após este tempo, desliga-se a misturadora da corrente elétrica e abre-se a torneira que se localiza na parte inferior da cuba metálica para depositar a pasta por gravidade no molde do equipamento que se pretende executar o ensaio (Figura 6a). O teor em água definido para preparar a pasta tem em consideração dois aspetos: evitar segregação, que aumenta com o aumento do teor em água (Raposo, 2016), e assegurar uma deposição contínua da pasta. No caso de se utilizar um teor em água próximo do limite de liquidez dos rejeitados da mina da Panasqueira (LL = 23%), a deposição da pasta não ocorre de forma contínua. Optou-se assim por utilizar um teor em água de 27%, que permite uma deposição contínua e sem segregação da pasta, o que garante a qualidade das amostras. No topo dos moldes da amostra é colocada uma alonga (Figura 6c), seguindo-se da deposição da pasta, com um movimento circular, até a pasta atingir a superfície da alonga.

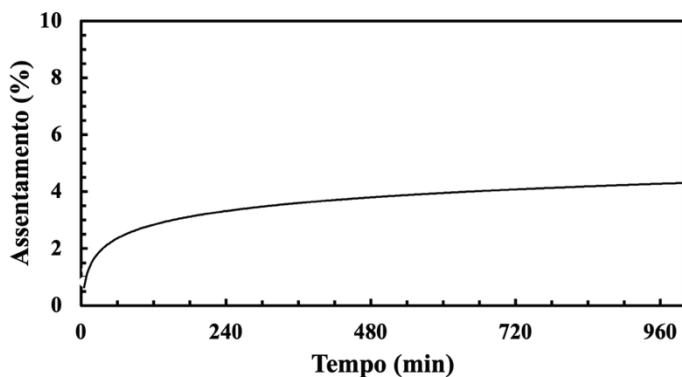
A utilização da alonga garante a obtenção de uma amostra homogénea ao longo de toda a altura da amostra, como é referido por Oliveira et al. (2024b). Esta peça foi desenvolvida com o objetivo de se depositar mais pasta, para fazer face ao assentamento, que ocorre no interior dos moldes, após a deposição. De facto, após a deposição do rejeitado na coroa circular da amostra, verifica-se a

ocorrência de um processo de sedimentação, acompanhado pela expulsão de água dos poros da amostra através do topo da amostra. Para garantir amostras homogêneas, quaisquer que sejam os equipamentos laboratoriais utilizados, vários provetes de teste foram preparados e o tempo de sedimentação e o respetivo assentamento à superfície foram registados, conforme ilustrado na Figura 7a. Verificou-se que 50 % do assentamento do topo da amostra decorre na primeira hora de sedimentação das partículas da pasta, sendo que, após quatro horas do processo de deposição, 80 % do assentamento já ocorreu. Face a estes resultados, estipulou-se um período de espera entre a deposição da pasta de rejeitado e as fases subsequentes da preparação de amostras de 12 horas.

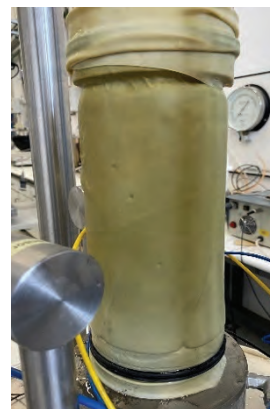


Fig. 6 – Sequência de montagem de amostras de rejeitados da mineração no HCA.: a) agitador mecânico; b) mistura dos rejeitados na cuba metálica; c) alongo após a deposição da pasta; d) amostra após assentamento; e) amostra com sucção; f) amostra com a instrumentação local instalada dentro da campânula.

Findo o período de sedimentação, retirou-se a alonga, assim como todo o excedente de pasta que ficou acima da superfície dos moldes. O excedente de pasta foi rasado ao nível do molde exterior e procedeu-se à limpeza de todas as partículas que se encontram sobre as membranas, para evitar problemas de fugas e/ou possíveis danos nas membranas derivado da elevada angularidade das partículas (Figura 6d). Após o processo anterior, procedeu-se à montagem da placa de topo da amostra (Figura 6e) que permite a aplicação de sucção na amostra para remover os moldes, instalação dos restantes componentes, entre os quais a instrumentação local. O nível de sucção a aplicar depende das características próprias dos equipamentos, do tipo de amostras e do ensaio a realizar, devendo ser aplicado a partir da base da mesma e aguardar-se que este estado de tensão induzido na amostra se instale homogeneamente em toda a sua altura. Caso seja aplicada sucção simultaneamente no topo e na base da amostra, poderá verificar-se estrangulamento no topo, em virtude da baixa permeabilidade característica deste rejeitado de mineração, tal como se ilustra na Figura 7b. O processo de preparação da amostra termina com o enchimento com água da cavidade interior da amostra, a colocação da campânula exterior e o seu preenchimento com água e a subida de pressões (Figura 6f).



a)



b)

Fig. 7 – Efeitos a considerar na preparação de amostras no HCA por deposição de lamaz: a) assentamento por sedimentação após o processo de deposição; b) estrangulamento do topo da amostra aquando de aplicação de sucção pelo topo.

Na preparação de amostras cilíndricas de secção cheia, ensaiadas no equipamento triaxial, o procedimento é em tudo idêntico com a exceção da utilização da alonga. Neste equipamento, como a altura do molde é superior à altura final da amostra, apenas tem de se garantir, com base na experiência acumulada nos ensaios de teste, uma deposição de material suficiente para, após o processo de sedimentação, se atingir a altura de amostra pretendida. As paredes verticais da membrana devem ser igualmente limpas para evitar que se danifiquem durante a colocação da pedra porosa e da placa de topo.

5 – INVESTIGAÇÃO LABORATORIAL

A presente investigação laboratorial envolve 5 ensaios laboratoriais: dois ensaios triaxiais (TX) e três ensaios de torção (HCA), cujas principais características se resumem no Quadro 2. Note-se que, no equipamento triaxial, a tensão axial (σ_a) corresponde à tensão vertical (σ_v) e as tensões radial (σ_r) e circunferencial (σ_θ) são iguais, sendo designadas de tensão horizontal (σ_h). O conhecimento da contrapressão inicial (u_0) permite definir o estado de tensão efetiva inicial da amostra, caracterizado pela sua tensão principal efetiva média (p'_0 , sempre igual a 100 kPa nos ensaios considerados). Foram realizados dois ensaios de torção cíclicos (C), diferenciados pelos números

“1” e “2” na sua designação, assim como um ensaio de torção monotónico (M), sendo a mesma designação adotada para os ensaios triaxiais. Todas as amostras foram preparadas segundo a metodologia descrita na Secção 4, tendo-se obtido, imediatamente após a deposição e antes do corte, um índice de vazios de 0,851. Após as fases de sedimentação, saturação ($B \geq 0,98$) e consolidação, o índice de vazios no início da fase de corte varia entre 0,529 e 0,552. Esta diferença deve-se sobretudo ao processo de sedimentação inicial, ilustrado na Figura 7a, que promove um rearranjo estrutural progressivo do rejeitado ao longo da deposição, sendo posteriormente acentuada pelas etapas de saturação e consolidação, que contribuem para a redução adicional do índice de vazios. Qualquer que seja o tipo ou modo de corte, todas as amostras foram ensaiadas com uma taxa de corte igual, isto é, $\Delta\epsilon_a = \Delta\gamma_{z\theta} = 0,25 \text{ \%}/h$.

Quadro 2 – Características dos ensaios para avaliação do comportamento tensão-deformação.

Designação	Equipamento	Consolidação				Corte		
		Tipo	$\sigma_a, \sigma_r, \sigma_\theta,$ (kPa)	u_0 (kPa)	p'_0 (kPa)	Drenagem	Tipo	Modo
TX-100-M	Triaxial	Isotrópico	630	530	100	Não drenado	Monotónico	Compressão
TX-100-C	Triaxial		630	530	100		Cíclico	Compressão/ Extensão
HCA-100-M	HCA		630	530	100		Monotónico	Torção
HCA-100-C1	HCA		630	530	100		Cíclico	Torção
HCA-100-C2	HCA		630	530	100		Cíclico	Torção

5.1 – Validação dos ensaios

A qualidade da metodologia desenvolvida para a preparação de amostras foi demonstrada por Oliveira et al. (2024b) ao comparar trajetórias de tensões para ensaios de compressão monotónicos para diferentes tensões efetivas iniciais. Idênticas conclusões podem ser retiradas da análise do início das trajetórias de tensões dos vários ensaios monotónicos e cíclicos realizados, ilustradas na Figura 8. Independentemente do tipo de carregamento, na sua fase inicial, todos os ensaios apresentam trajetórias de tensões similares. Este resultado era expectável uma vez que, no primeiro ciclo de carga e até ocorrer inversão de direção de aplicação de carga, as ações monotónica e cíclica são iguais. Os troços iniciais das trajetórias de tensões refletem igualmente as diferenças resultantes dos modos de carregamento. As amostras submetidas a trajetórias de compressão demonstram ter um comportamento contrativo mais acentuado, derivado da maior geração de pressões intersticiais (Figura 11). Ou seja, para iguais níveis de tensão principal intermédia, a tensão de corte mobilizada nos ensaios triaxiais é inferior à mobilizada nos ensaios de torção. Para tal contribui a influência do fator de tensão principal intermédia, que em trajetórias de compressão é nulo e, em trajetórias de torção simples é 0,5. Tal como é demonstrado por Araújo Santos (2015), a resistência ao corte mobilizada em solos granulares em ensaios de torção é superior à mobilizada em ensaios de compressão.

Outro aspeto fundamental da validação dos resultados obtidos é a calibração dos instrumentos de medição utilizados no controlo dos ensaios. No presente caso, embora se tenha verificado a calibração de todos os instrumentos do HCA, algum erro afetou a calibração à torção da célula de carga, dando origem a uma resposta algo distinta da prevista. De facto, contrariamente aos ensaios triaxiais cíclicos, em que se verifica uma inversão das direções das tensões principais aquando da inversão de compressão para extensão, nos ensaios de torção, a inversão de direção do momento torsor não afeta a direção das tensões principais. Em consequência, é usual verificar-se, nos ensaios cíclicos no HCA, uma simetria das trajetórias de tensões e do comportamento tensão-deformação para valores de tensões ou distorções positivas e negativas, respetivamente, para areias (Araújo

Santos, 2015). Por oposição, nos ensaios triaxiais cíclicos, verifica-se uma maior geração de pressões intersticiais em extensão, originando maior acumulação de distorções neste sentido de carregamento. O erro de calibração da célula de carga do HCA originou uma resposta dos rejeitos de mineração que originava, de forma irrealista, maior geração de pressões intersticiais e distorções num sentido da torção, tal como se ilustra na Figura 9. Este erro foi corrigido e os restantes resultados apresentados no artigo são representativos do comportamento real dos rejeitados ensaiados.

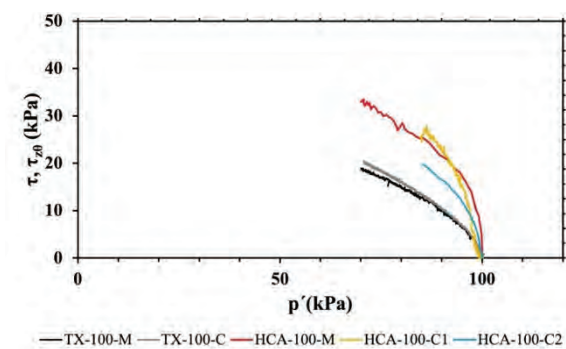


Fig. 8 – Tramo inicial das trajetórias de tensões para os vários ensaios realizados; b) influência da qualidade da calibração da célula de carga nos resultados.

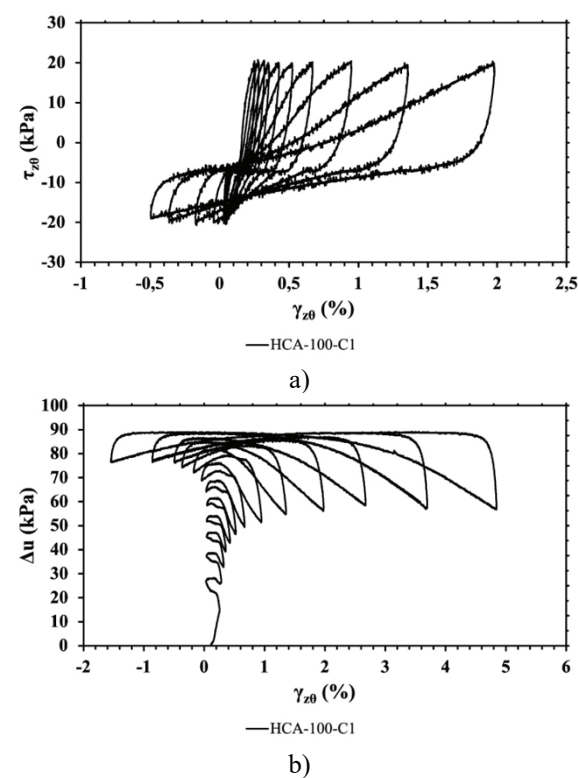


Fig. 9 – Efeitos de um erro de calibração da célula de carga nos resultados de ensaios cíclicos no HCA: a) comportamento tensão deformação; b) geração de pressões intersticiais em função do nível de deformação.

5.2 – Resposta dos rejeitados sob ações generalizadas

Inicia-se a análise da resposta dos rejeitados de tungsténio pela comparação entre as trajetórias de tensões dos carregamentos monotônicos e cíclicos (Figura 10). Como referindo anteriormente, existe uma satisfatória sobreposição das trajetórias até ocorrer inversão da direção de aplicação da carga para ambos os modos de carregamento. Quando submetidas a carregamentos monotônicos, as amostras contraem até atingirem o estado de transformação de fase, altura em que começam a dilatar e a pressão intersticial se reduz durante o corte, quer nos ensaios de carga axial (Figura 11a) quer nos ensaios de torção (Figura 11b). À semelhança do que acontece em solos granulares, este comportamento manter-se-á até atingir o estado crítico. Note-se que o modo de carregamento tem uma influência significativa na geração de pressão intersticial. No ensaio de carregamento axial, a redução de geração de pressão intersticial para extensões maiores é pouco significativa, mantendo-se praticamente constante. No ensaio de torção, a geração de pressões reduz drasticamente, verificando-se gerações negativas de pressões intersticiais (Figura 11b) que conduzem a um aumento da tensão de corte (Figura 10b). Idêntica influência do modo de carregamento é verificada quando se comparam ensaios de compressão e de extensão.

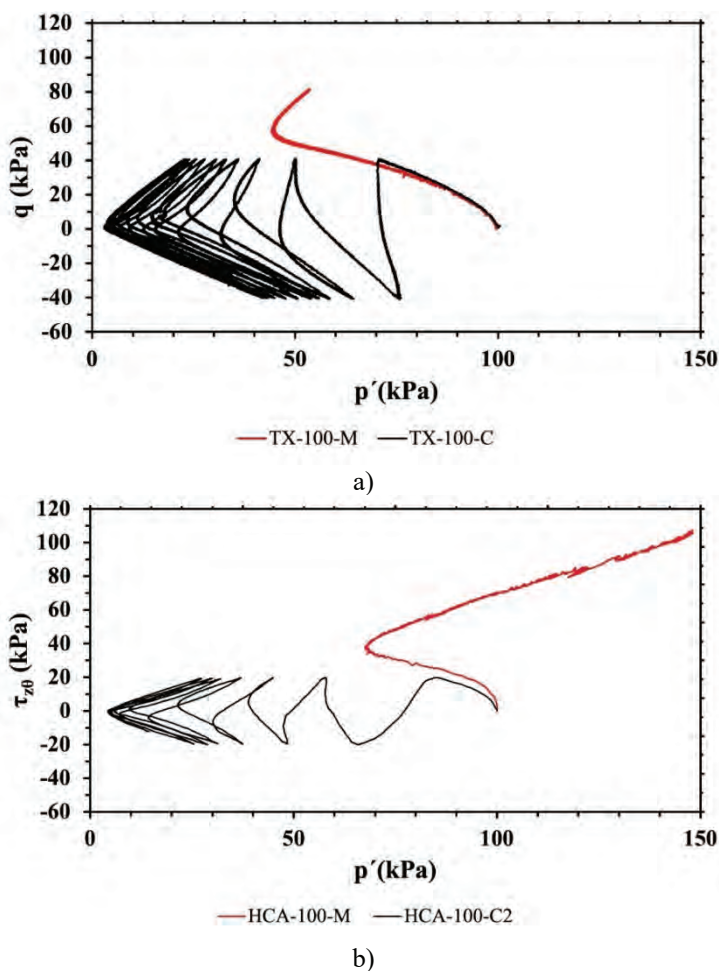


Fig. 10 – Trajetórias de tensões dos ensaios monotônicos e cíclicos: a) ensaios de carga axial; b) ensaios de torção.

Quando submetidas a carregamentos cíclicos, as trajetórias de tensões obtidas (Figura 10) revelam que o primeiro ciclo de carregamento induz excessos de pressão intersticial superiores aos ciclos seguintes, tal como referido por Suazo et al. (2016). Esta resposta é independente do modo de carregamento. Nos ciclos seguintes, o incremento de pressão intersticial, embora seja mais pequeno entre ciclos consecutivos, vai reduzindo o estado de tensão efetiva conduzindo à ocorrência de liquefação por mobilidade cíclica. Este mecanismo é igual ao observado nos ensaios triaxiais cíclicos realizados com rejeitados de zinco e da barragem de El Torito, apresentados respetivamente por Suazo et al. (2016) e Solans et al. (2019), ou de rejeitados de ferro, apresentados por Coelho e Camacho (2024). Além disso, a anisotropia de comportamento observada relativamente aos caminhos de tensões seguidos pelas amostras no carregamento cíclico pós-liquefação ilustram a importância do caminho de tensões imposto à amostra, tanto em compressão e extensão triaxial (Figura 10a) como no corte torsional imposto no HCA (Figura 10b), tal como identificado por Fanni et al. (2024) e Fanni et al. (2025) através de ensaios monotónicos.”

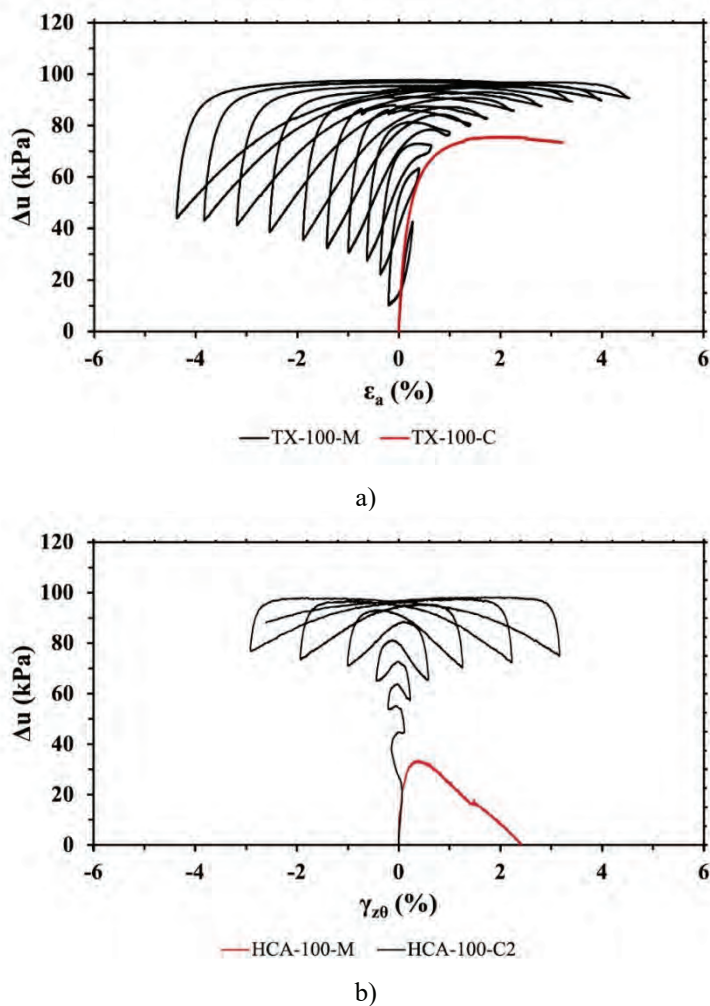


Fig. 11 – Geração de pressões intersticiais durante os ensaios monotónicos e cíclicos:
a) ensaios de carga axial; b) ensaios de torção.

Após ocorrência de liquefação por mobilidade cíclica, a amplitude de geração intersticial num ciclo é máxima e sensivelmente constante entre ciclos consecutivos. Como se pode observar na Figura 11a, existe uma concentração da geração intersticial quando a amostra está submetida a trajetórias de extensão axial no decorrer dos ensaios cíclicos axiais, corroborando o referido anteriormente em relação à influência do modo de carregamento. Por sua vez, nos ensaios de torção (Figura 11b), a geração de pressões intersticiais ocorre de forma praticamente simétrica, dado não se verificar rotação repentina das direções das tensões principais.

O comportamento tensão-deformação observado nas mesmas amostras está ilustrado na Figura 12. Em ambos os modos de solicitação monotónica, as amostras apresentam um comportamento de deformação com endurecimento no seu caminho para o estado crítico.

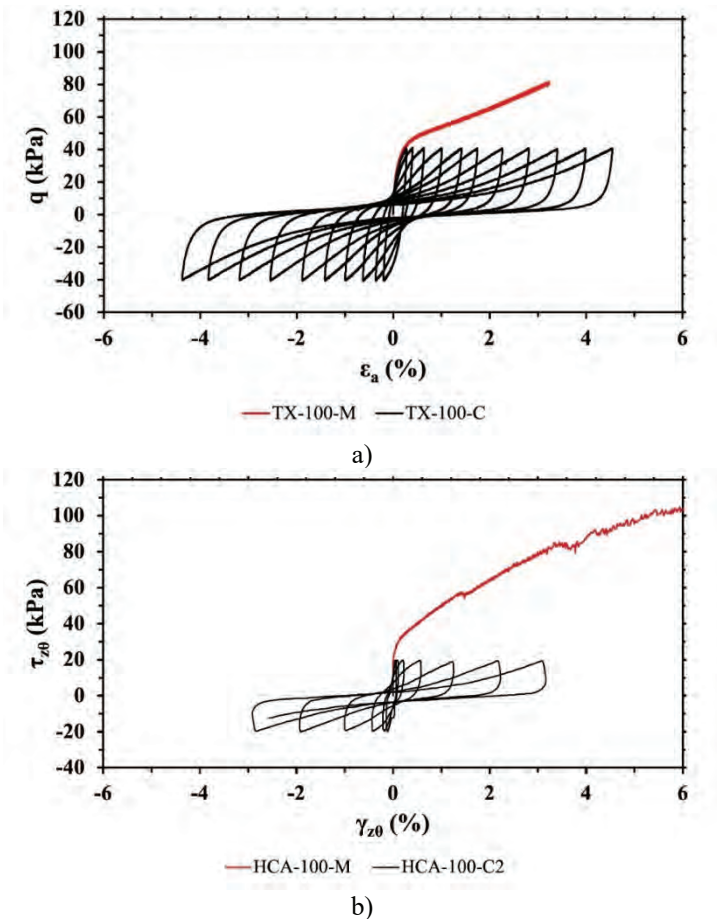


Fig. 12 – Comportamento tensão-deformação resultante da aplicação de carregamentos monotónicos e cíclicos: a) ensaios de carga axial; b) ensaios de torção.

No que se refere às solicitações cíclicas, verifica-se que, no caso da solicitação axial, existe uma simetria algo inesperada de extensões axiais durante as fases de carregamento em compressão e extensão. Esta observação contraria resultados anteriores, nomeadamente os propostos por Suazo et al. (2016), em que as extensões axiais tendem a acumular-se em extensão. Note-se que, em solos granulares, tende a verificar-se, igualmente, esta tendência assimétrica na acumulação de extensões axiais. Nos ensaios de torção cíclica, as distorções acumulam-se simetricamente nas duas direções de carregamento, tal como se observa em geral nos solos granulares.

De notar ainda que, em nenhum dos dois modos de carregamento, se verificou a anulação das tensões efetivas nos ensaios cíclicos (Figura 10). A razão de pressões intersticiais (r_u), que se define como o quociente entre a variação da pressão intersticial (Δu) e a tensão efetiva inicial (p'_0), atingiu, no máximo, 0,95. Idêntico comportamento é observado nos resultados apresentados por Suazo et al. (2016), o que pode resultar dos efeitos da direção das tensões principais induzidas durante o carregamento cíclico, cuja influência no carregamento monotónico é claramente demonstrado por Fanni et al. (2024) e Fanni et al. (2025).

5.3 – Comportamento para pequenas deformações

No domínio das pequenas deformações, o comportamento de solos depende de dois aspetos fundamentais: a rigidez de corte inicial e a degradação da rigidez com o aumento da deformação. No presente estudo, por não terem sido utilizados instrumentos de medição local nos dois equipamentos, nomeadamente na célula de trajetórias de tensões, não são apresentados resultados referentes à degradação da rigidez dos rejeitados de mineração de volfrâmio para níveis de deformação relativos às muito pequenas deformações.

No estudo da degradação da rigidez de corte, definem-se dois módulos de distorção ou deformabilidade: o módulo tangente e o módulo secante. Contrariamente aos carregamentos monotónicos, o conhecimento do módulo tangente não é representativo do comportamento do solo num ciclo de carregamento (Kramer, 1996). Nestas condições, a definição do módulo secante, que se define como o declive da reta que une as duas extremidades do ciclo histerético de tensão-deformação, fornece informações mais úteis para avaliar o comportamento do solo (Rascol, 2009). Por uma questão de coerência, definem-se, para os dois tipos de carregamento, apenas os módulos secantes. Adicionalmente, a comparação de resultados obtidos em dois modos de carregamento diferentes (torção e axial) requer que os resultados sejam representados num mesmo plano, optando-se pelo módulo de distorção e pela distorção.

Nesse sentido, o módulo de distorção secante (G_{sec}) obtido de ensaios de torção no HCA é obtido através da equação (1), que relaciona a tensão de corte (τ) e a distorção (γ), em que o índice (0) se refere à situação inicial. O módulo de distorção resultante dos ensaios triaxiais é obtido por aplicação da equação (2). Em condições triaxiais e não drenadas, em que o coeficiente de Poisson assume o valor 0,5, a tensão de desvio (q) e a extensão triaxial de desvio (ε_s) são obtidos pela equação (3) e (4), respetivamente. Nestas equações σ_{ver} , σ_{hor} , ε_{ax} e ε_{rad} representam a tensão vertical, a tensão horizontal, a extensão axial e a extensão radial, respetivamente. Nas condições enunciadas, é possível estimar a distorção através da aplicação da equação (5).

$$G_{sec} = \frac{\tau - \tau_0}{\gamma - \gamma_0} \quad (1)$$

$$G_{sec} = \frac{\Delta q}{3 \cdot \Delta \varepsilon_s} \quad (2)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{vert} - \sigma_{hor} \quad (3)$$

$$\varepsilon_s = \frac{2}{3}(\varepsilon_{ax} - \varepsilon_{rad}) \quad (4)$$

$$\gamma = \varepsilon_{ax} - \varepsilon_{rad} = (1 + \nu) \cdot \varepsilon_{ax} = 1,5 \cdot \varepsilon_{ax} \quad (5)$$

A variação do módulo de distorção secante com a evolução da distorção nos ensaios monotónicos e cíclicos realizados na célula de trajetória de tensões e no HCA está representada nas figuras a) e b) da Figura 13, respetivamente. Os efeitos do modo de corte são mais visíveis nos ensaios monotónicos (Figura 13a), obtendo-se um comportamento mais rígido nos ensaios de torção do que nos ensaios de corte axial. Este comportamento pode dever-se ao efeito da tensão principal intermédia na resposta dos solos aos carregamentos impostos, à semelhança do que é observado no estudo dos parâmetros de resistência em solos granulares (Araújo Santos, 2015). Embora o HCA esteja equipado com instrumentação local, as comparações de resultados e conclusões apresentadas resultam de leituras registadas na instrumentação global no HCA e externa no equipamento triaxial, reduzindo possíveis erros associados ao cálculo do módulo de distorção. Note-se, todavia, que tal efeito não seria suficiente para justificar as diferenças observadas para níveis de G relativamente elevados, como os observados nos ensaios.

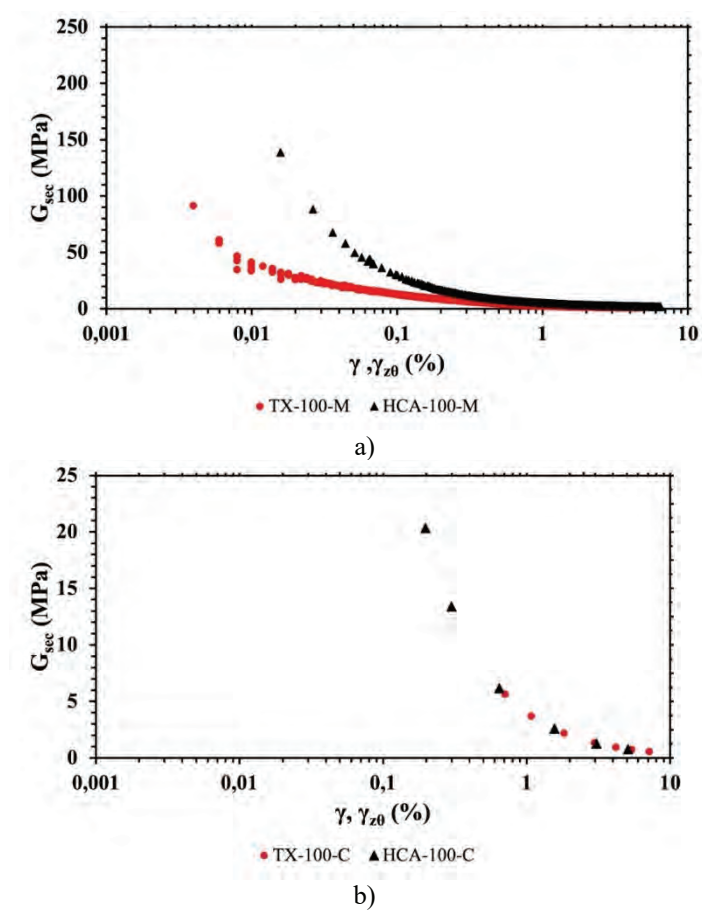


Fig. 13 – Influência do modo de carregamento: a) ensaios monotónicos; b) ensaios cíclicos.

Nos ensaios de corte cíclico (Figura 13b) não se observa a diferença de rigidez de corte encontrada nos ensaios monotónicos, ainda que para os valores de extensão apresentados essa diferença nos ensaios monotónicos já seja também muito menos significativa Face aos dados recolhidos pela instrumentação global em ambos os ensaios, existe uma boa convergência de resultados entre os dois modos de carregamento cíclico. Porém, importa referir que a largura do

primeiro ciclo histerético nos ensaios triaxiais é mais de três vezes superior ao ciclo histerético nos ensaios de torção, não sendo possível efetuar comparações para níveis mais baixos de deformação.

A análise da influência do tipo de carregamento (monotónico ou cíclico) na degradação do módulo de rigidez de corte do rejeitado de mineração revela respostas diferentes em função do modo de corte. Nos ensaios triaxiais, os resultados apontam para um módulo secante algo superior nos ensaios cíclicos, quando comparados com os ensaios monotónicos (Figura 14a).

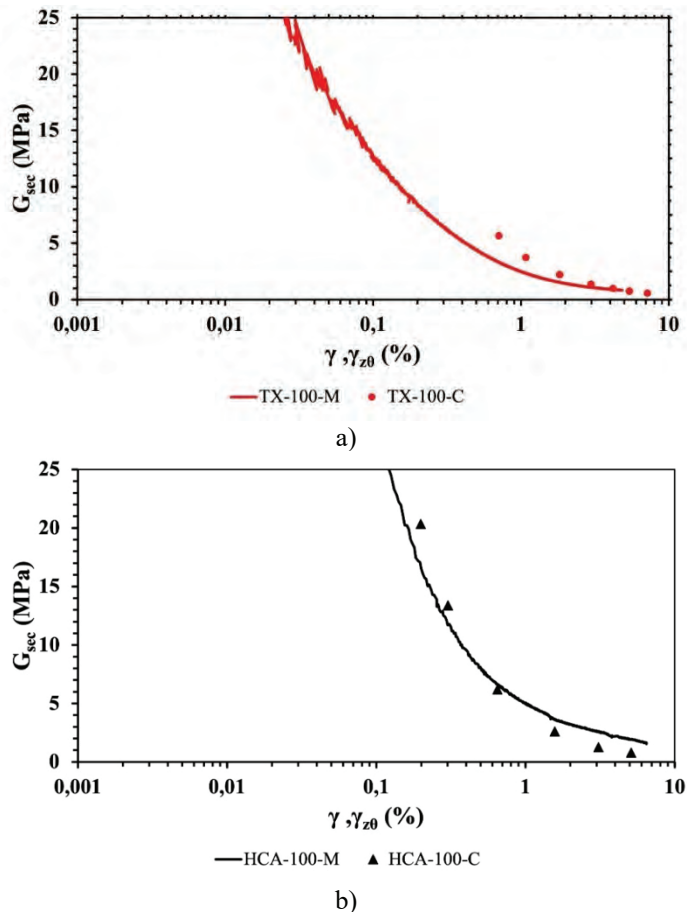


Fig. 14 – Influencia do tipo de carregamento: a) ensaios triaxiais; b) ensaios de torção simples.

Idênticas conclusões são apresentadas por Pan et al. (2022) no seu estudo realizado sobre argilas marinhas intactas e Teachavorasinskun et al. (2002) em argilas moles. Estes últimos autores referem que as diferenças observadas podem resultar das taxas de corte aplicadas, que podem estar na origem dessas diferenças. Porém, no presente estudo, as taxas de corte foram as mesmas em todos os ensaios. A tendência anteriormente identificada não se verifica nos ensaios de torção simples (Figura 14b). Para este tipo de carregamento, existe uma razoável concordância entre os resultados obtidos nos ensaios monotónicos e cíclicos. Atribui-se a diferença de comportamento à influência da tensão principal intermédia na resposta das amostras. De facto, nos ensaios de torção, o fator da tensão principal intermédia é constante e igual a 0,5, qualquer que seja o sentido de corte. Por sua vez, nos ensaios triaxiais, este parâmetro varia entre 0 (trajetórias de compressão) e 1 (trajetórias de extensão). Ou seja, nos ensaios cíclicos, verificam-se constantes rotações das tensões principais a cada meio ciclo.

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A resposta de rejeitados de mineração a ações generalizadas requer o recurso a vários tipos de ensaios que permitam impor modos e tipos de corte diferentes. Nesse sentido, o HCA revela ser, do ponto de vista teórico, uma ferramenta experimental adequada para o estudo destes geomateriais passíveis de sofrerem liquefação induzida por sismos, nomeadamente por ser capaz de aplicar solicitações cíclicas às amostras que se aproximam mais da solicitação induzida por ações sísmicas in situ. Além disso, a sua grande versatilidade, bem como o elevado controlo permitido sobre todas as componentes do equipamento, permitem estudar trajetórias de tensões mais diversificadas e, frequentemente, mais realistas, permitindo inferir sobre a influência de parâmetros que, nos equipamentos convencionais, seria difícil ou até impossível determinar.

A preparação de amostras cilíndricas, sobretudo, mas não só, quando ocas, de rejeitados da mineração, através da técnica de deposição de pastas, apresenta um desafio com alguma complexidade. Para fazer face a essas dificuldades, desenvolveram-se metodologias que permitem a preparação de amostras consistentemente uniformes e homogéneas. Realça-se, igualmente, a importância da verificação da calibração de todos os instrumentos de leitura. Como se demonstra, as informações registadas podem originar uma interpretação errónea da resposta mecânica.

A investigação laboratorial corrobora e identifica aspetos fundamentais do comportamento de rejeitados de mineração de volfrâmio, que podem ser eventualmente generalizados a geomateriais semelhantes:

- À semelhança do que acontece em materiais granulares em condições não drenadas, e qualquer que seja o modo de corte monotónico considerado, os rejeitados contraem até atingirem o estado de transformação de fase. A partir deste instante, o material apresenta uma resposta dilatante, mantendo esta tendência até, eventualmente, atingir o estado crítico.
- Quando submetidos a cargas cíclicas, verifica-se um decréscimo gradual do estado de tensão efetiva, que conduz à ocorrência de liquefação por mobilidade cíclica.
- Para os dois modos de corte cíclico considerados, verifica-se uma simetria do comportamento tensão-deformação, contrariando o observado em estudos anteriores, tanto sobre rejeitados como em materiais granulares, que apontam para uma acumulação de deformação em trajetórias de extensão em ensaios triaxiais cíclicos.

A comparação da resposta mecânica deste geomaterial a ações generalizadas realça ainda a influência que o modo e o tipo de corte têm na geração de pressões intersticiais em condições de carregamento não drenado:

- Após atingir o estado de transformação de fase, a geração de acréscimos negativos de pressão intersticial é muito mais significativa nos ensaios de torção do que nos ensaios de compressão axial, conduzindo a tensões de corte superiores no primeiro modo de corte.
- Quando submetido a cargas cíclicas, verifica-se uma geração cíclica e positiva de pressão intersticial, sendo esta geração superior no primeiro ciclo e mais reduzida nos subsequentes.
- Após ocorrência de liquefação por mobilidade cíclica, a geração de pressões intersticiais é dependente do modo de corte. Nos ensaios cíclicos triaxiais, verifica-se uma concentração dessa geração nas trajetórias de extensão, a qual supera largamente a acumulada nas trajetórias de compressão, devido ao efeito da tensão principal intermédia, que nos ensaios de extensão coincide com a tensão principal máxima, enquanto nos ensaios de compressão coincide com a tensão principal mínima, ocorrendo uma rotação brusca das tensões principais entre estas fases de corte. Já nos ensaios de torção, esta geração é simétrica e tem valores independentes da direção de solicitação, ocorrendo uma variação gradual das direções principais.

- À semelhança do observado em estudos anteriores, em nenhum dos dois modos de carregamento se verificou a anulação total das tensões efetivas, observando-se uma razão de pressões intersticiais máxima de 0,95.

As conclusões anteriores apontam para o efeito que a tensão principal intermédia tem na resposta mecânica dos rejeitados de mineração de volfrâmio. De facto, nos ensaios de torção, o fator da tensão principal intermédia é constante e igual a 0,5, qualquer que seja o sentido de corte. Por sua vez, nos ensaios triaxiais, este parâmetro varia entre 0 (trajetórias de compressão) e 1 (trajetórias de extensão). Esta dedução é complementada pela análise e comparação da degradação do módulo de rigidez secante nos quatros ensaios efetuados:

- A degradação da rigidez de corte em função do aumento da deformação revela existir um comportamento mais rígido nos ensaios de torção do que nos ensaios de corte axial. O comportamento observado deve-se ao efeito da tensão principal intermédia na resposta dos solos aos carregamentos aplicados.
- Nos ensaios triaxiais, os resultados apontam para um módulo de distorção secante cíclico superior ao monotónico, corroborando estudos anteriores. Já nos ensaios de torção, existe uma razoável concordância entre a evolução dos dois módulos de distorção secante. Sendo a taxa de corte igual, atribui-se a diferença de comportamento à influência da tensão principal intermédia na resposta das amostras.

Os resultados apresentados reforçam a importância da utilização de modos de solicitação em laboratório que sejam tão próximos quanto possível dos presentes *in situ*, uma vez que o comportamento dos materiais é, em geral, bastante dependente do modo de solicitação.

7 – AGRADECIMENTOS

O trabalho de investigação apresentado neste trabalho enquadra-se no Projeto de Investigação GeoSusTailing – “Geotechnics for Safe and Sustainable Mine Tailings Management”, financiado pela FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia- e tendo a referência PTDC/ECI-EGC/4147/2021.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agurto-Detzel, H.; Bianchi, M.; Assumpção, M.; Schimmel, M.; Collaço, B.; Ciardelli, C.; Barbosa, J. R.; Calhau, J. (2016). *The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence*. Geophys. Res. Lett., 43 (10), pp. 4929–4936. <https://doi.org/10.1002/2016GL069257>
- Antunes, S. M. P. B. (2010) *Levantamento do estado de contaminação da Barragem de Lamas e escombreira da mina da Panasqueira*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Araújo Santos, L. (2015). *Caracterização do Comportamento Mecânico da Areia de Coimbra sob Ações Generalizadas*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- ASTM (2006). D 2487 – *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system)*. American Society for Testing and Materials, USA.
- Atkinson, J. H. (2000). *Non-linear stiffness in routine design*. Géotechnique, 50(5), 4, pp. 87–508.
- Ávila, P. F.; Silva, E. F.; Salgueiro, A. R.; Farinha, J. A. (2008). *Geochemistry and mineralogy of mill tailings impoundments from the Panasqueira Mine (Portugal): implications for the surrounding environment*. Mine Water and the Environment 27(3), pp. 210-224. <https://doi.org/10.1007/s10230-008-0046-4>

- Bishop, A. W.; Wesley, L. D. (1975). *Hydraulic Triaxial Apparatus for Controlled Stress Path Testing*. Géotechnique, 25, pp. 657–670. <https://doi.org/10.1680/geot.1975.25.4.657>
- BS 1377 (1975). *Methods of Test for Soil for Civil Engineering Purposes*. British Standards, London. British Standard Institution, Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes.
- Burland, J. B. (1989). “*Small is beautiful*” – the stiffness of soils at small strains. The ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture. Canadian Geotechnical Journal, 26 (4): pp. 499-516.
- Carneiro, J. J. V.; Marques, E. A. G.; da Fonseca, A. J. P. V.; Ferraz, R. L.; Oliveira, Â. H. C. (2023). *Characterization of an Iron Ore Tailing Sample and the Evaluation of Its Representativeness*. Geotechnical and Geological Engineering 41(7), pp. 2833-2852. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02430-8>
- Carraro, J.; Prezzi, M. (2008). *A New Slurry-Based Method of Preparation of Specimens of Sand Containing Fines*. Geotechnical Testing Journal, 31 (1), pp. 1-11. <https://doi.org/10.1520/GTJ100207>
- Chern, J. C. (1985). *Undrained response of saturated sands with emphasis on liquefaction and cyclic mobility*. Tese de Doutorado, University of British Columbia, Vancouver.
- Coelho, P.; Camacho, D. (2024). *The Experimental Characterization of Iron Ore Tailings from a Geotechnical Perspective*. Applied Sciences, 14(12), 5033. <https://doi.org/10.3390/app14125033>
- Dominguez-Quintans, C.; Carraro, J. A. H.; Zdravkovic, L. (2023). *A Critical Assessment of the Effect of Initial Fabric on Key Small-Strain Design Parameters of Slurry-Deposited Silts and Sands*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 149(7), pp. 04023047. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-11305>
- Dos Santos, R. A.; Vulpe, C.; Fourie, A.; Jefferies, M.; Silva, J. P. S.; Toé, M. D. (2025). *Shear wave velocity and small-strain stiffness across a broad range of states in iron tailings*. Canadian Geotechnical Journal 62. <https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0751>
- Fanni, R.; Reid, D.; Fourie, A. (2024). *Effect of principal stress direction on the instability of sand under the constant shear drained stress path*. Géotechnique 74(9), pp. 875-891. <https://doi.org/10.1680/jgeot.22.00062>
- Fanni, R.; Reid, D.; Fourie, A. (2025). *Drained and undrained behaviour of a sandy silt gold tailings under general multiaxial conditions*. Géotechnique, pp. 1-20. <https://doi.org/10.1680/jgeot.23.00186>
- Fourie, A.; Reid, D.; Ayala, J.; Russell, A.; Vo, T.; Rahman, M.; Vinod, J. (2021). *Improvements in Estimating Strengths of Loose Tailings: Results from the TAILLIQ Research Project*. Proc. Mine Waste and Tailings, pp. 207–217. AusIMM.
- Gasparre, A. (2005). *Advanced laboratory characterization of London clay*. Tese de Doutorado, Imperial College London, Londres, Reino Unido.
- Hu, L.; Wu, H.; Zhang, L.; Zhang, P.; Wen, Q. (2016). *Geotechnical Properties of Mine Tailings*. Journal of Materials in Civil Engineering. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001736](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001736)
- Ishihara, K.; Towhata, I.; Yamazaki, A. (1985). *Sand liquefaction under rotation of principal stress axes*. 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 1015-1018, San Francisco, USA.

- Islam, S. (2021). *A Study on the Mechanical Behaviour of Three Different Fine-Grained Mine Tailings*. Journal of King Saud University - Engineering Sciences.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. 1.^a Edição, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- Kuerbis, R. H.; Negussey, D.; Vaid, Y. P. (1988). *Effect of Gradation and Fines Content on the Undrained Response of Sand*. ASCE conference on hydraulic fill structures. Geotechnical Special Publication, 21, pp. 330–345. <https://dx.doi.org/10.14288/1.0062832>
- LNEC (1965). NP-83 – *Solos: Determinação da densidade das partículas*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Portugal.
- LNEC (1966). Especificação E 196-1966 – *Solos: Análise granulométrica*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- LNEC (1969). NP-143 – *Solos: Determinação dos limites de consistência*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Portugal.
- Luong, M. P.; Sidaner, J. F. (1981). *Undrained behaviour of cohesionless soils under cyclic and transient loading*. 1st International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, pp. 215-220, St. Louis, USA.
- Macedo, J.; Vergaray, L. (2022). *Properties of mine tailings for static liquefaction assessment*. Canadian Geotechnical Journal 59(5), pp. 667-687. <https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0600>
- Malekzadeh, M.; Lovisa, J.; Sivakugan. N. (2015). *Consolidation of Cannington Mine Tailing at Its Liquid Limit*. 12th Australia - New Zealand Conference on Geomechanics, Wellington, New Zealand.
- Minh, N. A. (2006). *An investigation of the anisotropic stress-strain-strength characteristics of an Eocene clay*. Tese de Doutoramento, Imperial College London, Londres, UK.
- Neiva, A. M. R. (2008). *Geochemistry of Cassiterite and Wolframite from Tin and Tungsten Quartz Veins in Portugal*. Ore Geology Reviews, pp 221–238. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.05.013>
- Oliveira, J. P.; Araújo Santos, L.; Ribeiro, J.; Coelho, P.; Pedro, A. M. G. (2024a). *Influence of Environmental Conditions on the Behaviour of Tailings from Tungsten Mining for Sustainable Geotechnical Applications and Storage*. Sustainability, 16(24), 10987. <https://doi.org/10.3390/su162410987>
- Oliveira, J. P.; Coelho, P.; Araújo Santos, L. (2024b). *Application of the slurry deposition method to the reconstitution of samples of wolframite ore tailings*. XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 1860-1863, Lisboa, Portugal. <https://doi.org/10.1201/9781003431749-348>
- Pan, K.; Yuan, Z. H.; Zhao, C. F.; Tong, J. H.; Yang, Z. X. (2022). *Undrained shear and stiffness degradation of intact marine clay under monotonic and cyclic loading*. Engineering Geology 297, 106502. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106502>
- Raposo, Nuno Pereira. (2016). *Deposição de rejeitados espessados. Caracterização experimental e modelação numérica*. Tese de Doutoramento da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Porto, Portugal. <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/86809>
- Rascol, É. (2009). *Cyclic properties of sand: dynamic behaviour for seismic applications*. Tese de Doutoramento, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland.

- Rico, M.; Benito, G.; Salgueiro, A. R.; Díez-Herrero, A.; Pereira, H. G. (2007). *Reported tailings dam failures- A review of the European incidents in the worldwide context*. Journal of Hazardous Materials, 152 (2), pp. 846–852. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.050>
- Robertson, P. K.; de Melo, L.; Williams, D. J.; Wilson, G. W. (2019). *Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I* (Investigation report commissioned by Vale S.A).
- Rodríguez, R.; Muñoz-Moreno, A.; Caparrós, V. A. (2021). *How to Prevent Flow Failures in Tailings Dams*. Mine Water Environ, pp. 83–112. <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00752-8>
- Schnaid, F.; Bedin, J.; Viana da Fonseca, A. J. P.; Moura Costa Filho, L. (2013). *Stiffness and strength governing the static liquefaction of tailings*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 139 (12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000924](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000924)
- Seed, H. B.; Lee, K. L. (1965). *Studies of the liquefaction of sands under cyclic loading conditions*. Soil Mechanics and Bituminous Materials Laboratory, University of California. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0000913>
- Simão, F. C. S. V. (2017). *Avaliação do potencial em metais críticos nas células de lamas da Mina da Panasqueira (Barroca Grande, Portugal)*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Solans, D.; Kontoe, S.; Zdravkovic, L. (2019). *Monotonic and cyclic response of tailings sands*. Conference Earthquake risk and engineering towards a resilient world. Greenwich, London. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11898-2_181
- Suazo, G.; Fourie, A.; Doherty, J.; Hasan, A. (2016). *Effects of confining stress, density and initial static shear stress on the cyclic shear response of fine-grained unclassified tailings*. Géotechnique, 66 (5), pp. 401–412. <https://doi.org/10.1680/jgeot.15.P.032>
- Symes, M. J. P. R. (1983). *Rotation of principal stresses in sand*. Tese de Doutorado, Imperial College London, Londres, Reino Unido.
- Teachavorasinskun, S.; Thongchim, P.; Lukkunaprasit, P. (2002). *Stress rate effect on the stiffness of a soft clay from cyclic, compression and extension triaxial tests*. Géotechnique 52 (1), pp. 51–54. <https://doi.org/10.1680/geot.2002.52.1.51>
- USAID (2021). *Mining and the Green Energy Transition: International Development Challenges and Opportunities*. USAID Industry Lead for Mining. Burlington. USA. USCOLD (1994): Tailings Dam Incidents, U.S. Committee on Large Dams (USCOLD), Denver, Colorado, USA.
- Venda Oliveira, P. J. (1992). *Algumas características do comportamento de um solo de baixa plasticidade*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Viana da Fonseca, A.; Santos, J.; Coelho, P. A. L. F. (2021). *30 anos de progresso em 3 laboratórios de geotecnia de universidades portuguesas: caracterização de solos não plásticos*. Geotecnia 152, pp. 143–185. https://doi.org/10.14195/2184-8394_152_5
- Wang, R.; Zeng, F.; Li, L. (2021). *Applicability of Constitutive Models to Describing the Compressibility of Mining Backfill: A Comparative Study*. Processes, 2021 (9), 2139. <https://doi.org/10.3390/pr9122139>
- Witte, A.; Ekman, K.; Diaz, C. (2017). *Mine Environment Neutral Drainage Project*. MEND Report 2.50.1 Study of Tailings Management Technologies. Klohn Crippen Berger.

EL PAPEL DE LA GEOLOGÍA ESTRUCTURAL EN LOS GRANDES DESLIZAMIENTOS DE LA AUTOVÍA A7 EN GRANADA

The role of structural geology in the major landslides on the A7 motorway in Granada

Javier González-Gallego^a, Javier Moreno Robles^a, Alberto Fernandez^a, Jose Luis García de la Oliva^a, Carlos de las Heras^a

^a Laboratorio de Geotecnia (CEDEX), Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, España.

RESUMEN – A menudo vemos los grandes deslizamientos como una masa que se mueve independientemente de las condiciones geológicas regionales del entorno, pero éstas son un importante factor condicionante en la génesis de los grandes movimientos de ladera. Las obras de la autovía A-7, en la costa de Granada, han sido muy complejas debido a las particulares características tectónicas, litológicas y orográficas de la zona. En esta zona de las cordilleras Béticas, las pendientes naturales son muy pronunciadas y la heterogeneidad, estructura y características resistentes de los materiales han propiciado la aparición de ciertas patologías, relacionadas con los movimientos de laderas, de grandes dimensiones. La geología estructural de esta zona se caracteriza por una gran cantidad de apilamientos de mantos de cabalgamiento en un área muy reducida. La colisión norte-sur de las placas de Alborán e Ibérica provocó el levantamiento de los materiales metamórficos y sedimentarios. Esta colisión de placas dio lugar a la formación de las cordilleras Béticas con el macizo de Sierra Nevada y la cuenca del Guadalquivir. Este artículo muestra ejemplos de grandes movimientos de inestabilidad de laderas y su relación con la geología estructural de la zona.

ABSTRACT – We often study large landslides as a mass that moves independently of the regional geological conditions of the surrounding area, but these conditions are an important factor in the genesis of large slope movements. The construction of the A-7 motorway on the coast of Granada has been very complex due to the particular tectonic, lithological, and orographic characteristics of the area. In this area of the Baetic mountain ranges, the natural slopes are very steep, and the heterogeneity, structure, and resistant characteristics of the materials have led to the appearance of certain pathologies related to large-scale landslides. The structural geology of this area is characterized by a large number of thrust sheets in a very small area. The north-south collision of the Alboran and Iberian plates caused the uplift of metamorphic and sedimentary materials. This collision of plates led to the formation of the Baetic mountain ranges with the Sierra Nevada massif and the Guadalquivir basin. This article shows examples of large slope instability movements and their relationship with the structural geology of the area.

Palabras Clave – deslizamiento, esquistos, geología estructural.

Keywords – landslides, schists, structural geology.

E-mails: javier.gonzalez@cedex.es (J. González-Gallego), javier.moreno@cedex.es (J. Robles), alberto.fernandez@cedex.es (A. Fernandez), jgarliv@ciccp.es (J. Garcia de la Oliva), cherasmpe@gmail.com (C. Heras)

ORCID: orcid.org/ 0000-0002-6510-9547 (J. González-Gallego), orcid.org/0000-0001-8217-0000 (J. Robles)

1 – INTRODUCCIÓN

La ejecución de las obras de la autovía A-7 en la zona de la costa de Granada, en el tramo entre Adra y Motril, ha sido muy compleja debido a la particular configuración tectónica, lito-estructural y orográfica de la zona.

La autovía A-7 tiene más de 1300 km y recorre todo el litoral mediterráneo de la península ibérica desde Barcelona hasta Algeciras, siendo una de las redes de comunicación más importantes del territorio español. El tramo entre Adra y Motril fue el último en ejecutarse debido a las complejas características geológicas y orográficas de la zona.

Las grandes pendientes naturales de las cordilleras Béticas en esta zona, que llegan hasta el mar, sumadas a la heterogeneidad, estructura y características resistentes de los materiales han provocado la aparición de algunas patologías, relacionadas con el movimiento de laderas, de grandes dimensiones.

En la Figura 1 se muestra una vista obtenida con Google Earth, en la que se ha representado el trazado de la autovía A7 entre las localidades de Motril y Adra. Se aprecia en esta imagen la complejidad del trazado debido a la orografía de la zona, que se trata de un sistema montañoso adyacente al mar de Alborán. De esta forma, las laderas del sistema montañoso tienen una pendiente elevada, en muchas ocasiones más de 30° que llegan hasta la costa. Del mismo modo el buzamiento general de la esquistosidad y los planos de cabalgamiento también es en dirección sur, hacia el mar. Esto hace que, en realidad, muchas de estas laderas estén en movimiento de forma natural, encontrándose habitualmente grandes deslizamientos activos.

El trazado se dispuso paralelo a la línea de costa de forma que, para la construcción de la autovía, que va a media ladera, ha sido necesaria la ejecución de grandes taludes del lado montaña. Estos taludes en muchas ocasiones, debido a la desfavorable orientación estructural, han presentado problemas de inestabilidad de grandes dimensiones.



Fig. 1 – Vista de la orografía del tramo de la autovía A7 entre Motril y Adra.

Desde hace varios años, el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (Centro de estudios y experimentación de obras públicas) ha participado en el estudio y definición de soluciones para varias de estas patologías.

En esta ponencia se muestran dos casos que ponen de relieve la importancia de las condiciones geológicas regionales en la formación de grandes deslizamientos que afecta a los taludes de la autovía A7.

2 – MARCO GEOLÓGICO Y ESTRUCTURAL

La zona de estudio se localiza en la franja costera mediterránea, al sur de Granada. Desde el punto de vista orográfico está situada en la ladera meridional del macizo montañoso de Sierra Nevada, cuyas estribaciones en la zona sur llegan hasta la costa.

Esta zona está encuadrada dentro del dominio tectónico de las Cordilleras Béticas, caracterizadas por una superposición de mantos de cabalgamiento en orden creciente de metamorfismo. Estos cabalgamientos se produjeron durante la orogenia alpina, a principios del Cenozoico, cuando el choque en dirección norte-sur de las placas de Alborán e Ibérica provocó el levantamiento de los materiales metamórficos y sedimentarios que hoy conforman las Cordilleras Béticas, dando lugar a la elevación de Sierra Nevada y la cuenca del Guadalquivir.

En concreto, el tramo entre Motril y Adra, está, desde el punto de vista geológico, contenido en las cordilleras béticas en el denominado Complejo Alpujárride.

Litológicamente los materiales predominantes son micaesquistos y filitas con alta concentración en micas, con intercalaciones centimétricas a decimétricas de cuarzoescquistos y cuarcitas (Gómez, A. 2012). En algunas ocasiones, debido a los mantos de cabalgamiento, aparecen superpuestos sobre estos materiales, grandes formaciones de mármoles dolomíticos y cuarcitas.

Por tanto se trata de materiales metamórficos de distinto grado, con altos grados de fracturación y esquistosidad muy marcada debido a la alta tectonización que han sufrido.

Las filitas, que son el tipo de esquistos más común en la zona, pertenecen a una unidad de cuarcitas, filitas cuarcíticas y filitas, y calcoesquistos, con presencia local de yesos; a la que se atribuye una edad permotriásica (Cueto, M. 2011). En los sondeos realizados esta unidad aparece, en ocasiones, con grados de alteración muy altos GM IV-V con aspecto de materiales arcillosos poco competentes.

En la Figura 2 se muestra, a modo de ejemplo, uno de los muchos desmontes que se han ejecutado en este tramo. En esta figura se muestra con una línea roja el rumbo de las capas y la dirección de buzamiento. Como se mencionaba anteriormente, debido a la orientación de las laderas, los desmontes del lado montaña son de gran altura y con una configuración estructural desfavorable desde el punto de vista de la estabilidad (Fossen, H. 2010). El rumbo de los estratos es subparalelo al trazado y el buzamiento, en los desmontes del lado norte, es hacia la calzada (sur). Esta configuración geométrica y geológica se mantiene bastante constante en todos los taludes del tramo de la A-7 entre Adra y Motril (González-Gallego et al, 2010).



Fig. 2 – Vista de uno de los grandes taludes de la zona indicándose la dirección de buzamiento y buzamiento de las capas.

Desde el punto de vista geológico, lo más destacable de la zona es la superposición en el espacio de un número elevado de mantos de cabalgamiento, alternándose, en la vertical, capas con diferentes grados de metamorfismo y distintas edades.

En la Figura 3 se muestra una vista de Google Earth combinada con la cartografía geológica elaborada por el IGME (Serie MAGNA 50.000, hoja 1056 Albuñol). En esta figura puede apreciarse como, en esta zona en concreto, hay una gran heterogeneidad de materiales sumada a una orografía abrupta. Destaca en esta figura como, en la zona próxima a Motril, existen grandes capas de mármoles, dispuestos de forma discordante sobre filitas, y en el resto de la traza los materiales son fundamentalmente calcoesquistos, cuarzosquistos y micaesquistos.

Los cabalgamientos, que fueron apilando materiales de sur a norte, provocaron que tanto la esquistosidad como los planos de contacto entre diferentes materiales tengan una dirección de buzamiento general hacia el sur (mar de Alborán).



Fig. 3 – Vista del trazado y orografía de la autovía A7 en la costa de Granada.

En la Figura 4 se puede apreciar un corte, a escala regional, en dirección NNO-SSE del entorno de la zona de estudio. En esta figura se refleja la orientación de la esquistosidad y de los planos de cabalgamiento. Esta disposición estructural, como se ha mencionado con anterioridad, es común en toda la zona de Granada, entre las localidades de Motril y Adra. A parte de las grandes estructuras de mantos de cabalgamiento también hay movimientos intracapa formando escamas de movimiento dentro de las estructuras mayores.

Además, al tratarse de mantos de cabalgamiento, muchas capas están desplazadas respecto a las que las rodean por lo que el ángulo de rozamiento de estas superficies puede ser próximo al residual.

Desde el punto de vista de esfuerzos tectónicos se trata de una zona en la que las tensiones “in situ” están muy condicionadas por los movimientos de choque entre las placas. Tratándose de una de las zonas más activas de la península ibérica desde el punto de vista sísmico.

En la Figura 5 se muestra un extracto del “Stress Map of the Mediterranean, 2016 GFZ Data Service”. En este extracto se ha recogido la zona del estrecho de Gibraltar y la parte al este del mismo. Se muestra en esta figura que, en la zona por donde transcurre la A7, es muy relevante la presencia de los esfuerzos tectónicos. En la actualidad predominan los esfuerzos de fallas normales (rojo), existiendo también, aunque en menor medida inversas (verde) y transformantes (azul).

El predominio de fallas normales indica un régimen distensivo en la zona que contribuye a una mayor facilidad de apertura de diaclasas, infiltración de agua a niveles más profundos y por consiguiente facilita el movimiento de las laderas de forma natural.

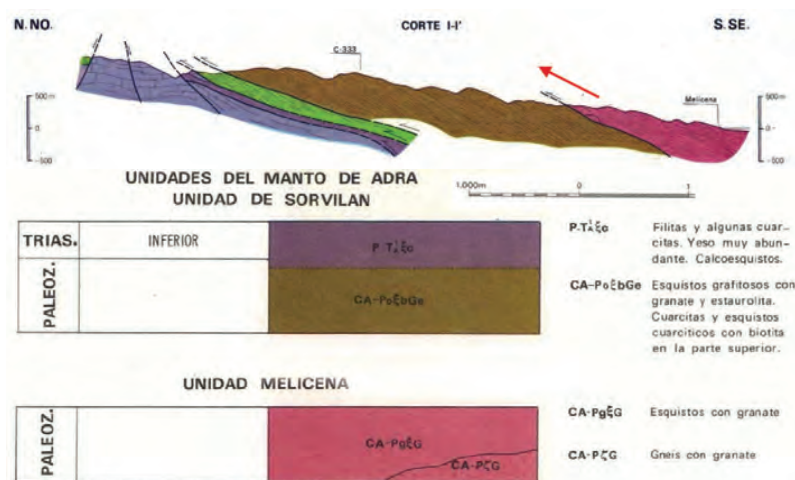


Fig. 4 – Corte SSE-NNO por la zona de estudio, fuente: IGME (Instituto Geológico y Minero de España) Serie MAGNA 50.000, Hoja 1056 Albuñol.

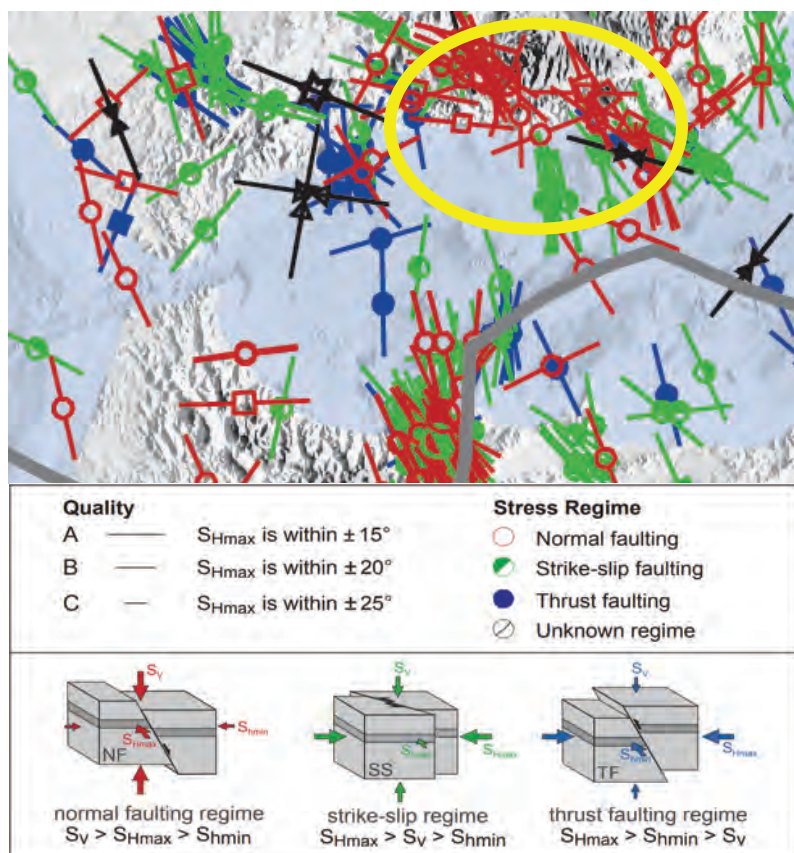


Fig. 5 – Vista del estado de esfuerzos tectónicos en el estrecho de Gibraltar y mar de Alborán. Stress Map of the Mediterranean and Central Europe 2016, GFZ Data Service, doi:10.5880/WSM.

3 – CASOS DE ESTUDIO

3.1 – Desmonte 32

El desmonte 32, es un talud de 50 m de altura y 365 m de longitud con una pendiente de 45°. Pertenece al tramo de la A7 Polopos-Albuñol, y presentó problemas de inestabilidad a finales del año 2009, cuando estaba excavado hasta su cota de rasante (González-Gallego et Al. 2013).

El talud mostraba claros signos de inestabilidad, grandes grietas que recorrían toda la parte superior al desmonte, abombamientos en el mismo y levantamiento del terreno en la zona del pie.

Geológica y estructuralmente la zona se caracteriza por ser parte de un manto de cabalgamiento de la unidad de Melicena, formado por esquistos micáceos, en los cuales se pueden apreciar escamas de cabalgamiento dentro de ellos.

En la Figura 6 se muestra un perfil geológico extraído de la Hoja MAGNA 1056 (Albuñol) de la zona en la que se indica con una flecha la situación de la excavación. En esta figura queda reflejada la disposición estructural de los materiales de la zona con una dirección de buzamiento hacia el mar y pendientes de las laderas naturales bastante pronunciadas. Además, algo más al norte, en la zona izquierda de la Figura 6 se aprecia la existencia de un gran plano de cabalgamiento marcando la orientación estructural general de las capas en toda la zona.

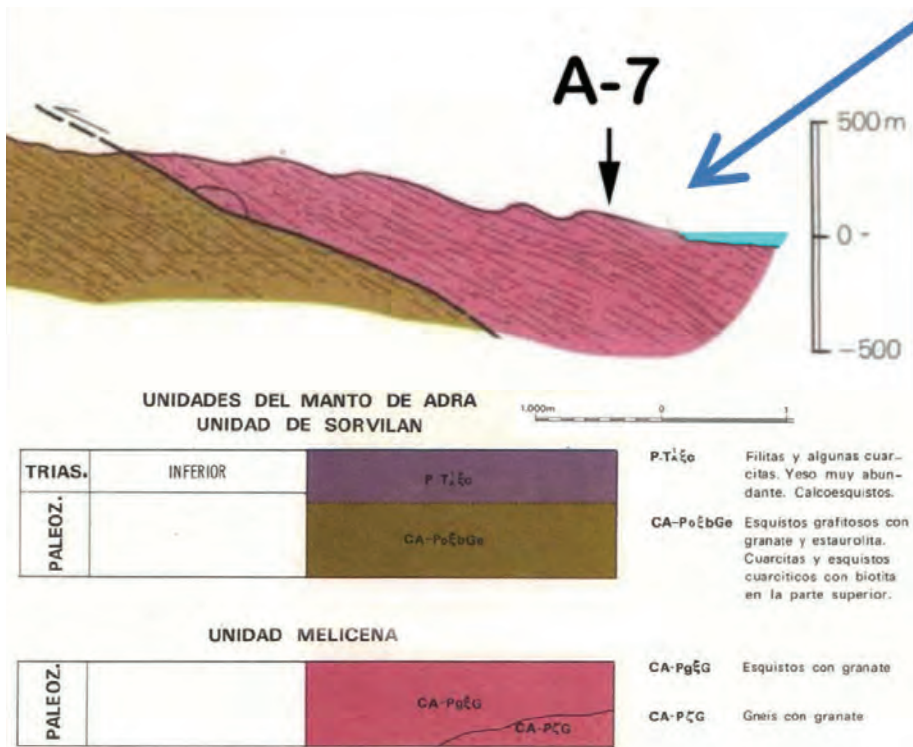


Fig. 6 – Perfil geológico de la ladera del desmonte 32. IGME (Serie Magna 1:50000, hoja 1056 Albuñol).

En la Figura 7 se muestra una vista de los esquistos que forman el talud. En esta imagen se aprecia una marcada esquistosidad hacia el sur, alta fracturación e intercalación de materiales más plásticos en los rellenos de las discontinuidades de cabalgamiento.



Fig. 7 – Vista de los esquistos y una superficie de falla inversa.

En la rotura, que se produjo a finales de 2009, se marcó un gran deslizamiento que afectaba hasta una distancia de 250 m hacia la parte superior de la ladera y una anchura de 200 m. En la Figura 8 se ha dibujado la superficie de la ladera afectada por el deslizamiento que, como puede apreciarse, es de grandes dimensiones, afectando a varias instalaciones agrícolas en la zona superior.



Fig. 8 – Vista de la zona afectada por el deslizamiento enmarcada dentro de la línea roja.

En las fotos de satélite previas a la excavación del talud puede observarse como la zona en la cual se ha desarrollado el deslizamiento forma un relieve destacado sobre el resto de la ladera. Esta loma adosada al resto de la ladera se puede interpretar como una escama de cabalgamiento que forma parte de una estructura superior que ha ido desapareciendo por la erosión y arrastre de los materiales

que la conformaban (Figura 9). Tanto la orientación de la esquistosidad y estructuras mayores, como los parámetros resistentes resultados de los movimientos tectónicos que afectaron a los materiales condicionaban claramente la estabilidad de la excavación.



Fig. 9 – Vista previa a la ejecución de las obras de la A7.

Los trabajos de reconocimiento y los posteriores de auscultación del desmonte se llevaron a cabo a lo largo de los años 2010, 2011 y comienzo de 2012, incluyendo en el periodo de control las temporadas de lluvias entre el otoño de 2010 y la primavera de 2011 y el otoño de 2011 y la primavera de 2012.

Consistieron en el control topográfico superficial mediante GPS y la ejecución de 11 sondeos con instalación de inclinómetros y piezómetros. También se realizaron estaciones geomecánicas y se realizó un análisis histórico de fotos de satélite.

Una vez definida la geometría del movimiento y estudiada su cinemática y condiciones de estabilidad la solución ejecutada consistió en retirar peso de la zona superior del talud ajustando la geometría de esta excavación a la de los invernaderos existentes. Esta solución se ha mostrado efectiva y en los últimos 15 años no se han detectado movimientos significativos en el talud.

En la Figura 10 se muestra el desmonte en su estado actual una vez finalizadas las obras de estabilización.



Fig. 10 – Vista del estado actual del talud con la excavación (línea rosa) realizada en la zona superior de ladera.

3.2 – Desmonte de Carchuna

El caso del desmonte de Carchuna trata de un gran deslizamiento con 80 m de desnivel, 370 m de longitud y 225 m de distancia desde la calzada hasta las grietas de cabecera. Este desmonte empezó a construirse en el año 2014 (Moreno, J., González-Gallego, J. 2017). Ya durante las fases iniciales de su excavación se produjeron inestabilidades en el talud. Estas inestabilidades afectaron sobretudo al tercio inferior del talud, a la zona de filitas, en la cual se apreciaban abundantes afluencias de agua.

En la Figura 11 se muestra el talud en fases iniciales de excavación. En esta figura se puede apreciar como los mármoles ocupan la parte superior del talud y su zona este (zona derecha de la figura). Las filitas y esquistos se encuentran bajo los mármoles, y en esa zona puede verse un deslizamiento de tipo circular en la zona central de la imagen que afecta fundamentalmente a filitas en una zona de afluencia de agua.

Se trata de una zona con una geología estructural compleja en la que un cabalgamiento, denominado manto de Murtas, ha superpuesto una capa de mármoles dolomíticos sobre las filitas y los calcoesquistos. Además, estos mármoles dolomíticos presentan un alto grado de fracturación y también karstificación por lo que suponen un aporte de agua importante a los materiales subyacentes.



Fig. 11 – Vista de una inestabilidad en el talud durante su ejecución.

En la Figura 12 se recoge una vista en tres dimensiones de la orografía y la geología de la zona. Además, se ha dibujado sobre ella el trazado de la autovía y la indicación del rumbo y dirección de buzamiento de las capas.

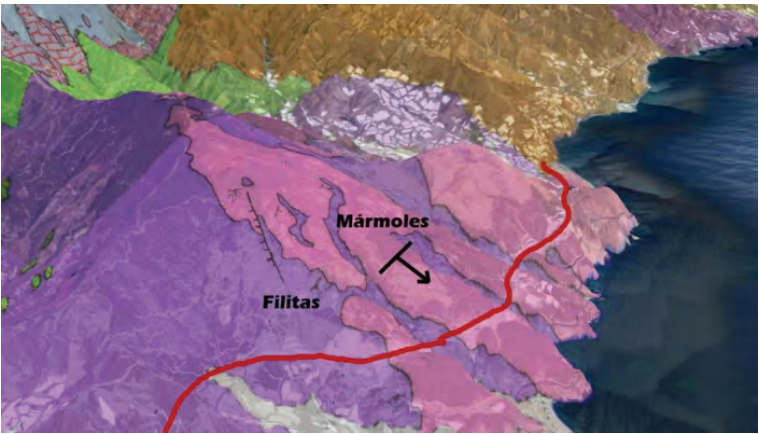


Fig. 12 – Vista de la configuración litológica y estructural de la zona. La línea roja representa el trazado de la autovía A-7. La línea negra representa el rumbo y dirección de buzamiento de las capas.

La ubicación de la excavación del desmonte respecto a los materiales presentes en la ladera se muestra en la Figura 13, en la que se puede ver cómo la trinchera de excavación ha afectado mayormente a los mármoles y en su parte inferior a las filitas. Como puede verse en dicha figura la disposición tanto de los planos de esquistosidad como de la estratificación de los mármoles y el plano de cabalgamiento son desfavorables para la estabilidad del talud del lado montaña. El plano de contacto entre los mármoles y las filitas es discordante, y está muy mecanizado. Así, de manera general, la estructura se caracteriza en esta zona por un contacto entre los mármoles y la filitas con un buzamiento de unos 15° hacia el SSO y por una esquistosidad que sigue una dirección casi paralela a la del contacto litológico, pero con un ángulo de buzamiento algo mayor (de hasta 40°).

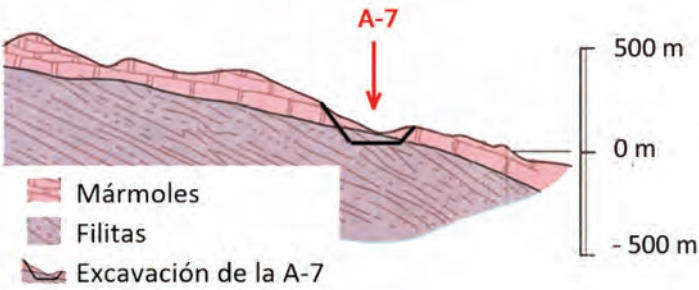


Fig. 13 – Vista de la disposición de mármoles y filitas junto a la trinchera de excavación de la traza.

La disposición oblicua, respecto a la calzada, del contacto entre mármoles y filitas hace que en el talud haya dos zonas claramente diferenciadas. En una de ellas (zona 1) predominan las filitas en la parte inferior, lo que provocó que se generaran deslizamientos en toda esa zona del talud, mientras que en la otra (zona 2) los mármoles llegan hasta el pie de la calzada por lo que al no aparecer filitas en el desmonte no se han producido deslizamientos.

En la Figura 14 se muestra la disposición de ambas zonas, junto al contacto entre filitas y mármoles (línea roja) y también se indica la dirección de buzamiento y buzamiento del plano de contacto entre ambas litologías.

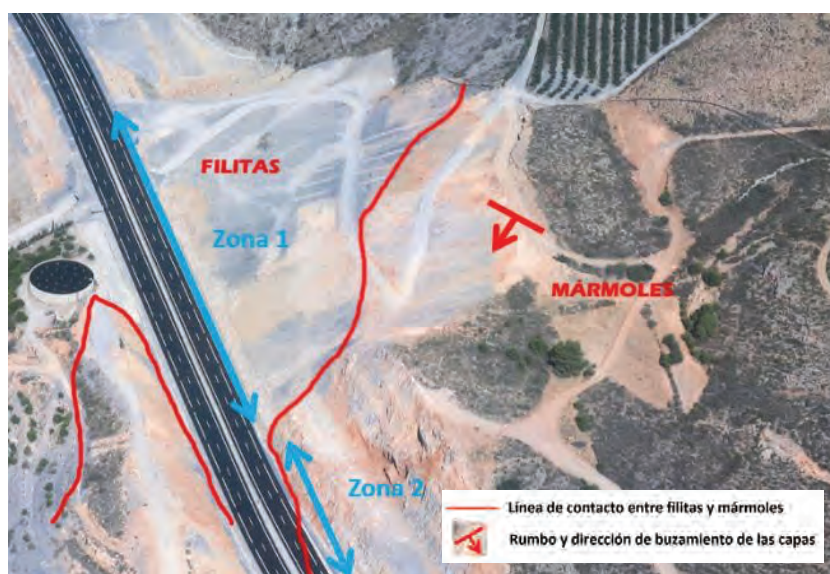


Fig. 14 – Vista de la disposición de mármoles y filitas en el talud.

La zona afectada por el movimiento se muestra en la Figura 15, en la que se ha dibujado el perímetro de las grietas que se formaron en toda la zona, si bien los movimientos en la zona de filitas eran mucho mayores, en la parte de los mármoles también se produjo la abertura de grietas de tracción en la zona superior.



Fig. 15 – Vista del área afectada por el deslizamiento. La línea roja representa el contorno de la zona movilizada.

Para investigar la cinemática del movimiento, sus características geotécnicas e hidrogeológicas se ejecutaron 13 sondeos (10 de ellos se equiparon con inclinómetros y el resto con piezómetros). Además, se instaló una red de 120 puntos de control topográfico y se realizaron estaciones geomecánicas. Posteriormente mediante fotogrametría a través de dron se realizó un modelo 3D de toda la ladera que permitió tener un modelo geométrico de la ladera de alta precisión y evaluar la estabilidad de las zonas de mármoles menos accesibles.

En la Figura 16 se ha recogido, en un perfil hecho por la zona de las filitas, la situación del plano de rotura, los movimientos de los vectores de los puntos de control topográfico y los sondeos que están en ese perfil. Ese perfil, además, refleja la disposición litológica y estructural de los materiales existentes en el talud.

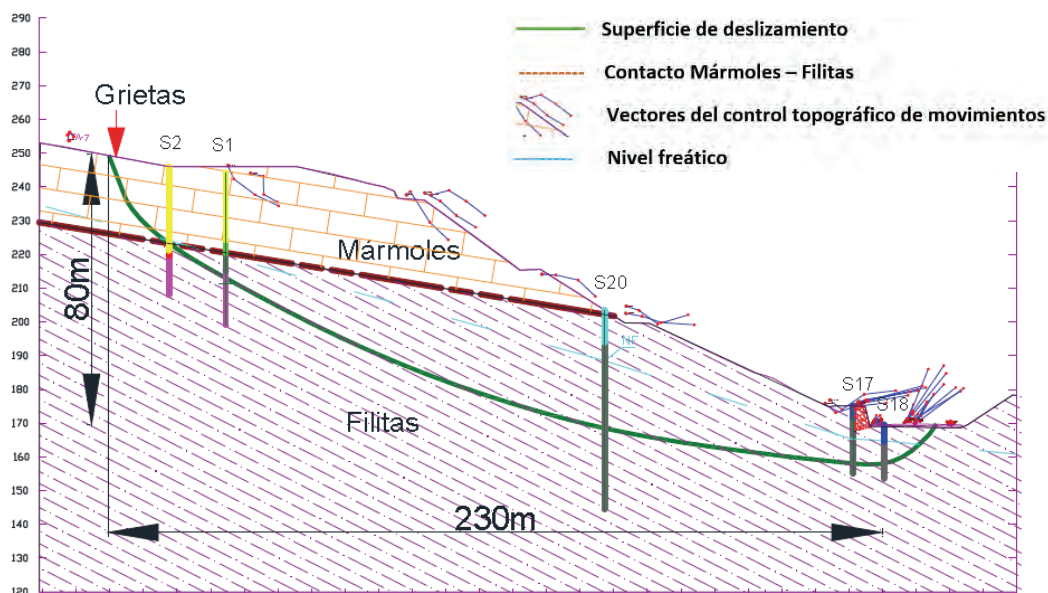


Fig. 16 – Perfil de la ladera con superficie de rotura y vectores de movimiento superficial.

Esta disposición asimétrica, de filitas y mármoles respecto a la calzada, hace que el deslizamiento tenga salida en la zona en la que las filitas afloran en la calzada, mientras que en la zona de los mármoles éstos llegan hasta el pie del talud y el plano de contacto entre ambas formaciones no tiene salida.

Debido a esta disposición estructural se produjo un movimiento rotacional horizontal en el que los mármoles actúan como eje de rotación sobre el que deslizan las filitas tal y como se muestra en las Figura 17 y Figura 18. En la Figura 17 se muestran los vectores de movimiento controlados por topografía, y puede apreciarse como en la zona lejana a los mármoles la velocidad es mucho mayor que en los puntos más cercanos a ese eje de rotación. Así, además de tener una superficie de rotura típica de deslizamiento circular, el movimiento global del terreno presenta una componente de giro horizontal en torno a la zona en la que los mármoles ocupan todo el talud.

En la Figura 18 puede apreciarse como los mármoles, en la zona inferior derecha de la imagen llegan hasta la calzada por lo que las filitas no afloran en esta zona. Al no aflorar las filitas en esta zona los mármoles no deslizan sobre ellas ya que la superficie de deslizamiento está bajo la calzada y no sobre ella como ocurre en la zona donde afloran las filitas.

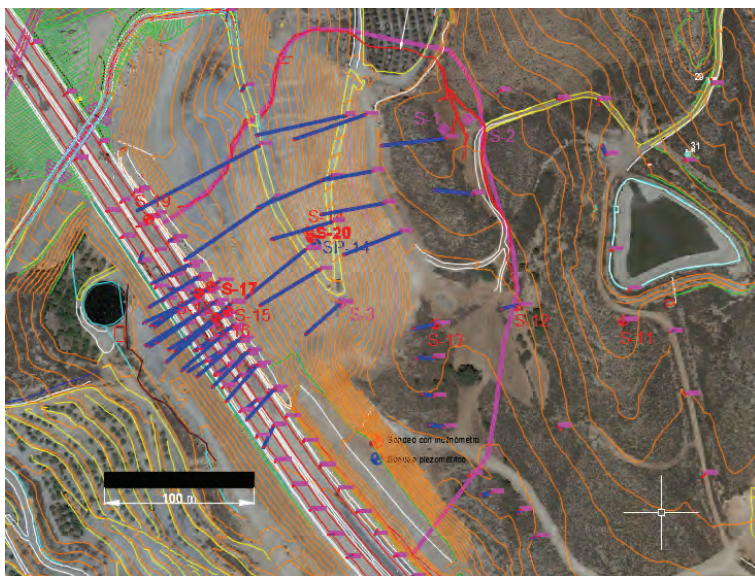


Fig. 17 – Las líneas azules representan los vectores de movimiento superficial controlados por topografía. La línea rosa representa el contorno de la zona movilizada.

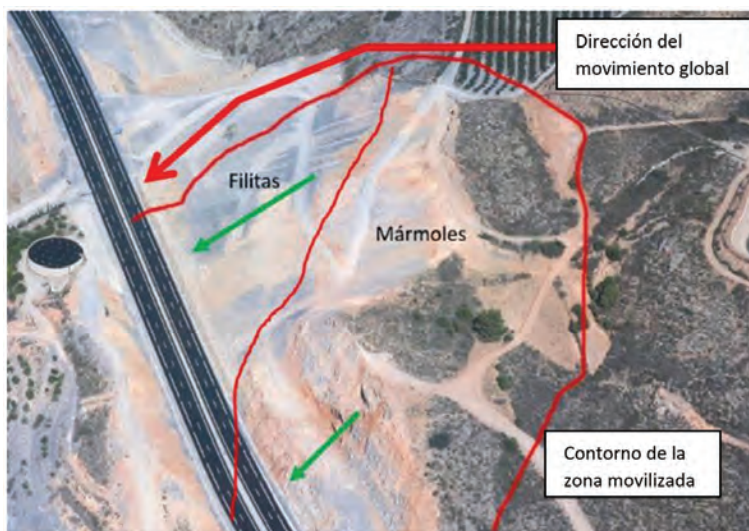


Fig. 18 – Representación del movimiento de giro del deslizamiento.

Con el modelo 3D obtenido por fotogrametría se pudo modelizar y calcular con MIDAS GTS NX v. 2016 la cinemática y estabilidad de la ladera. MIDAS GTS NX es un programa de elementos finitos todo en uno, enfocado a resolver problemas 3D y 2D de geotecnia. En la Figura 19 se muestra una imagen extraída del modelo de cálculo en la que puede observarse claramente la disposición oblicua del contacto entre filitas y mármoles. En la misma figura se ha representado la remodelación geométrica que ha formado parte de la primera fase de estabilización del talud. Esta primera fase consistió, fundamentalmente, en quitar peso de la zona superior, excavando gran parte de los mármoles y hacer una pequeña excavación en la zona inferior dejando un espacio entre la calzada y

el pie del talud. Esta pequeña excavación se pretendía que trabajara como zona fusible, creando un punto débil para que el pie de la rotura saliera por ahí y no afectara a la calzada. Esta solución ha funcionado muy bien y el pie del deslizamiento tiene salida ahora por esa zona sin afectar a la calzada.

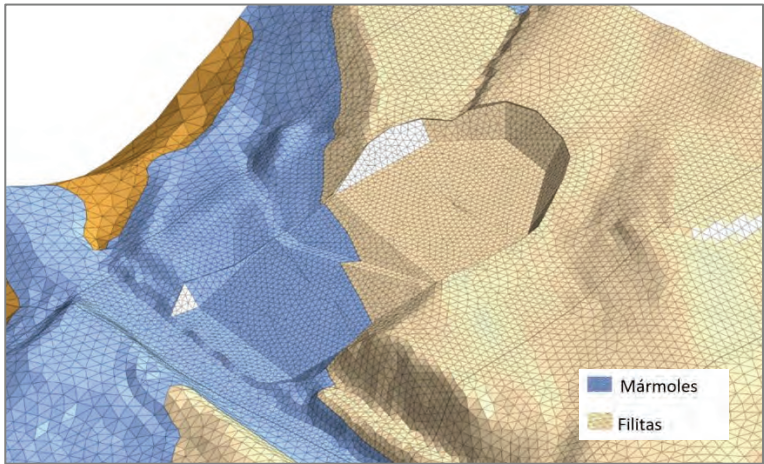


Fig. 19 – Vista del modelo de cálculo 3D de MIDAS GTS NX v.2016 en la que se aprecia la disposición oblicua del contacto filitas-mármoles.

Finalmente se muestra en la Figura 20 una vista del estado actual del talud (2025) una vez ejecutada la excavación que ha supuesto la primera fase de estabilización de la ladera. En esta figura se pueden ver claramente las diferentes partes del talud. En la zona izquierda de la imagen se pueden apreciar las filitas (color gris) en la zona inferior del talud. Dentro de las filitas se aprecia una zona de afluencia de agua, justo en el contacto con los mármoles y que ha provocado el crecimiento de vegetación en esa zona. Por encima de esa zona de filitas se encuentran los mármoles (tonos amarillentos y ocre) que en su mayor parte han sido excavados para quitar peso de la parte superior del deslizamiento.

En la zona derecha de la imagen se puede ver, con taludes mucho más verticales y una berma intermedia, el macizo de mármoles dolomíticos. Como se ha mencionado anteriormente en esta zona los mármoles llegan hasta el pie del talud sin que lleguen a aflorar las filitas que están bajo ellos.



Fig. 20 – Vista del estado actual del talud en 2025.

4 – CONCLUSIONES

Las obras de la autovía A-7, entre las localidades de Motril y Adra, se han visto dificultadas por las particulares características tectónicas, litológicas y orográficas de la zona.

Los mantos de cabalgamiento que se formaron durante el choque de las placas Ibérica y del mar de Alborán provocaron una superposición de materiales metamórficos, de bajo y medio grado, con una disposición estructural desfavorable para los grandes taludes, que era necesario ejecutar debido a la abrupta orografía de la zona.

Dentro de la variada casuística de deslizamientos existente en la zona se han presentado dos casos por su singularidad geológico-estructural y su cinemática.

En el caso del desmonte 32, éste se excavó sobre una escama de cabalgamiento adosada a la ladera. Estos materiales debido a su génesis presentan, además de una orientación desfavorable, una elevada esquistosidad, fracturación y bajos ángulos de rozamiento.

El desmonte de Carchuna destaca por haberse excavado en unos mármoles que están cabalgando sobre las filitas en un contacto mecánico discordante. Además, la orientación oblicua del contacto entre ambos materiales provocó un giro inusual en el plano horizontal de toda la masa deslizada.

En ambos casos se acometieron trabajos de estabilización, que han resultado efectivos, y que consistían fundamentalmente en modificaciones geométricas adaptadas a las características litológicas, orográficas y estructurales del terreno.

5 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cueto, M. (2011) *Comportamiento geotécnico de los materiales esquistosos alpujárrides en la autovía del mediterráneo (A-7)*. Máster en Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CEDEX).
- González-Gallego, J.; García de la Oliva, J.L.; De las Heras, C. (2010) *Estudio de la patología, trabajos de estabilización y comportamiento posterior de un gran desmonte de la autovía A-7 (Granada)*. 10 Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica (La Coruña).
- González-Gallego, J.; García de la Oliva, J. L.; De las Heras, C. (2013) *Estudio de los problemas de inestabilidad y medidas correctoras propuestas para el desmonte 32 en el tramo Polopos-Albuñol de la autovía del Mediterráneo, a-7, en la provincia de Granada*. VII Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables. Palma de Mallorca.
- Gómez, A. (2012) *Análisis de la problemática geotécnica de los túneles de los Ramoncillos, autovía A-7 Granada*. Master en Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (CEDEX).
- Fossen, H. (2010) *Structural Geology*. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. ISBN-13 978-0-511-77282-5.
- Google Earth pro Versión 7.3.6 (2024).
- Heidbach, O.; Custodio, S.; Kingdon, A.; Mariucci, M. T.; Montone, P.; Müller, B.; Pierdominici, S.; Rajabi, Reinecker, J.; Reiter, K.; Tingay, M.; Williams, J.; Ziegler, M. (2016). *Stress Map of the Mediterranean and Central Europe 2016*, GFZ Data Service. <https://doi.org/10.5880/WSM.Europe2016>
- Mapa Geológico de España. IGME Serie Magna. 1:50.000 Albuñol hoja 1056.
- Midas GTS NX v.2016 (Seúl, Corea).
- Moreno, J.; González-Gallego, J. (2017). *Análisis de la patología de un desmonte en la autovía A-7. Granada*. 17º Jornadas SEMSIG-AETESS.

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.



a) Inspeção visual em zona de perigo



b) Rotura da barragem

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).

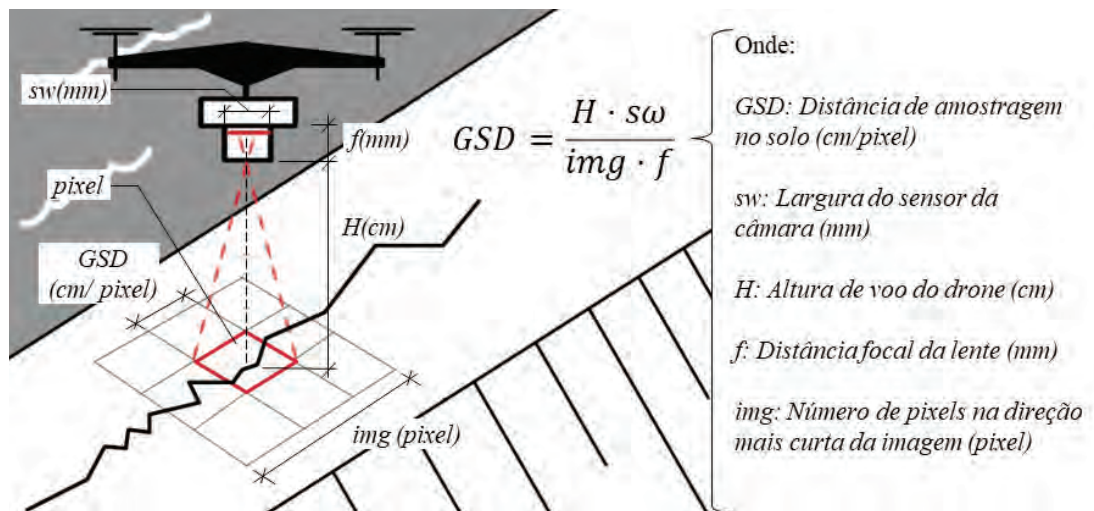


Fig. 3 – Ilustração do cálculo do GSD.

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 a 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).

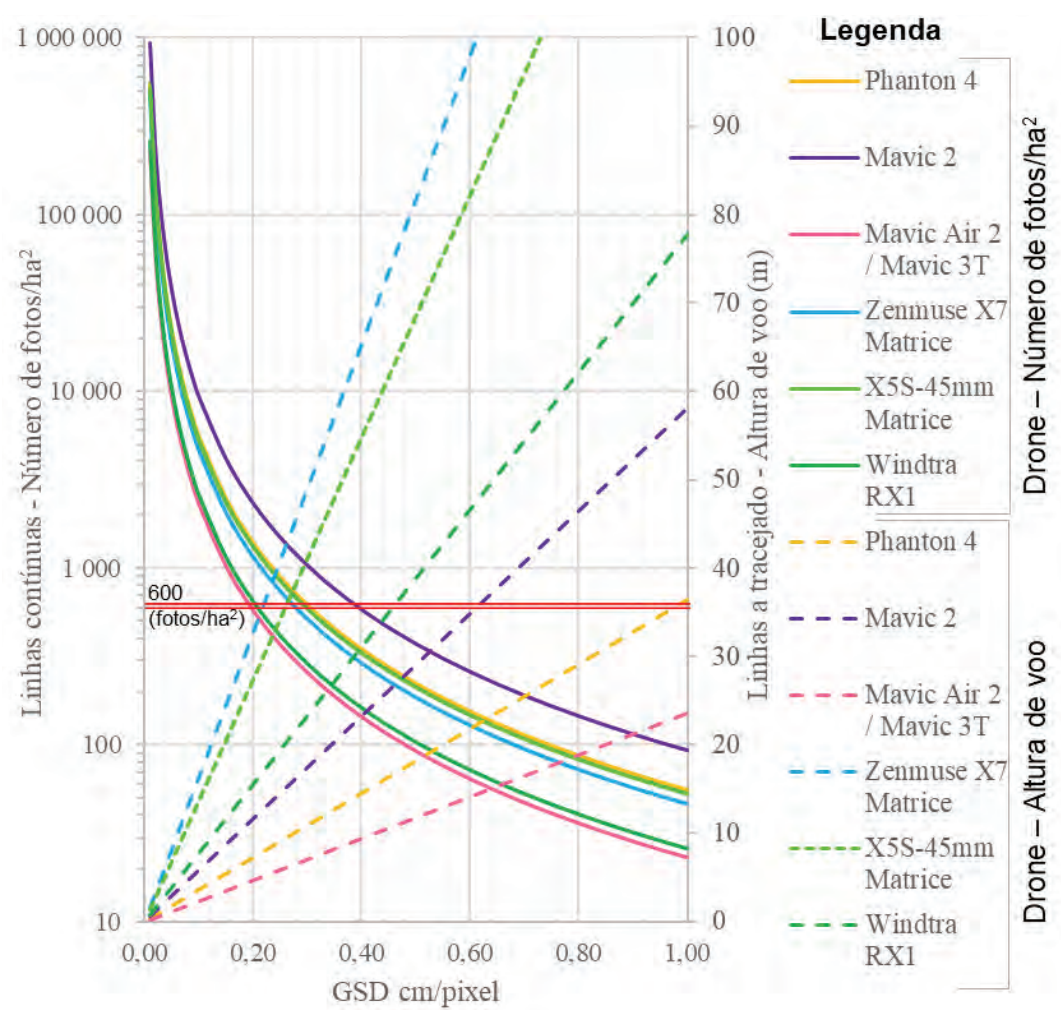


Fig. 4 – Relação entre o GSD, Número de Fotos/ha² e a Altura de Voo.

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 autônomo: 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.

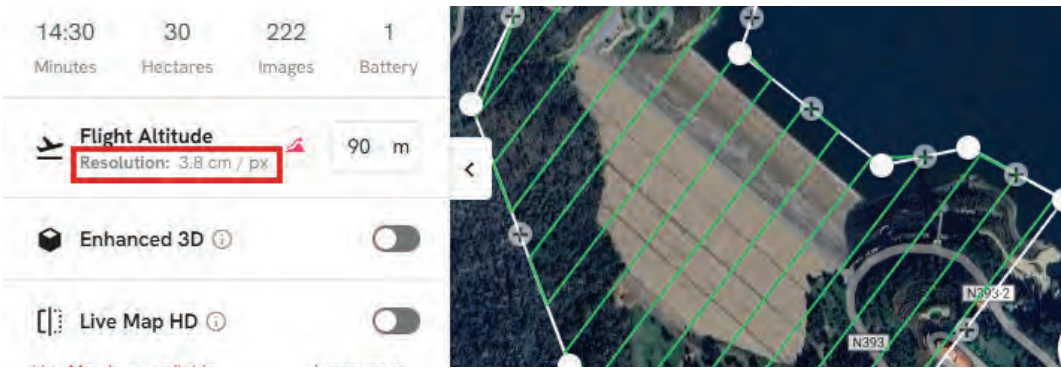


Fig. 5 – DroneDeploy - Definição da altitude de voo e GSD

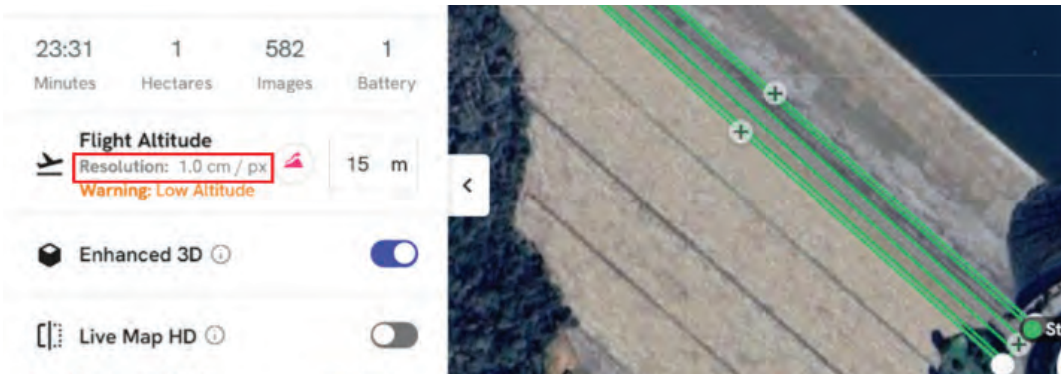


Fig. 6 – DroneDeploy - Mapeamento detalhado no coroamento.

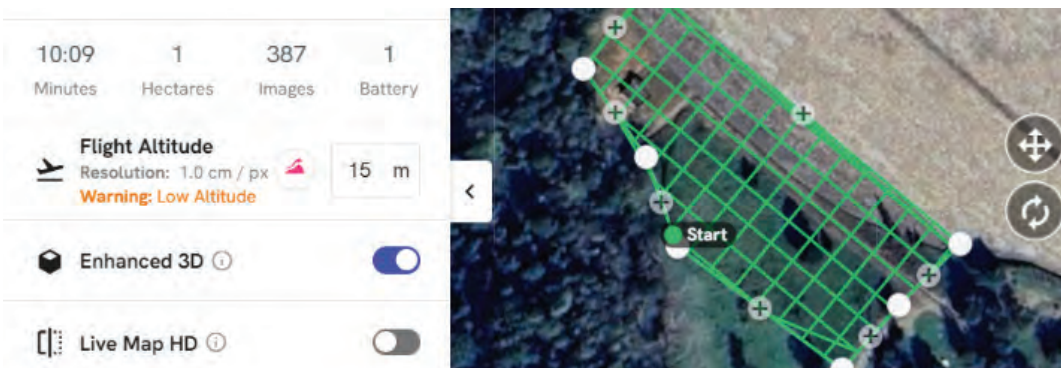


Fig. 7 - DroneDeploy - Mapeamento detalhado junto ao pé da barragem.

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 ortorectificado (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.

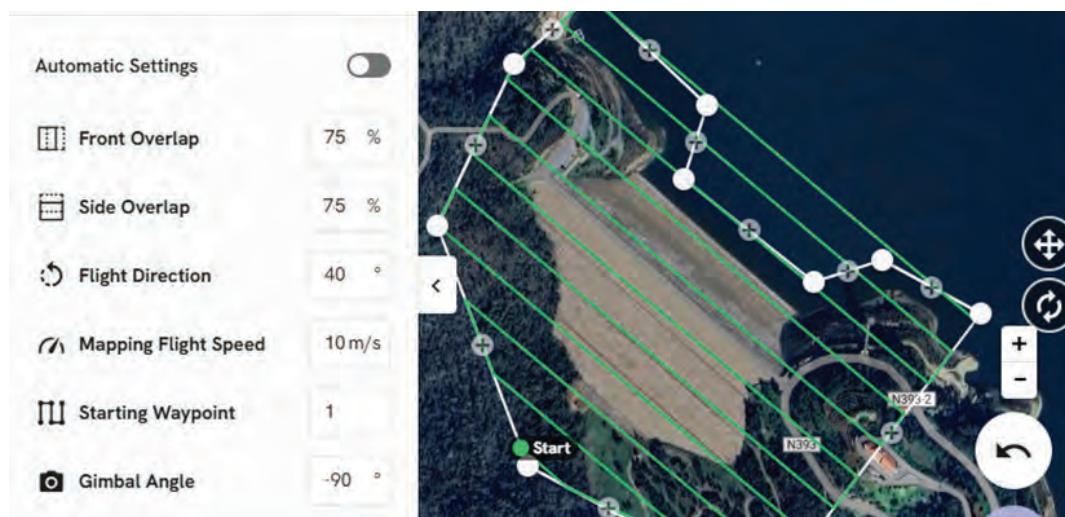


Fig. 8 - DroneDeploy - Configurações avançadas na plataforma.

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).

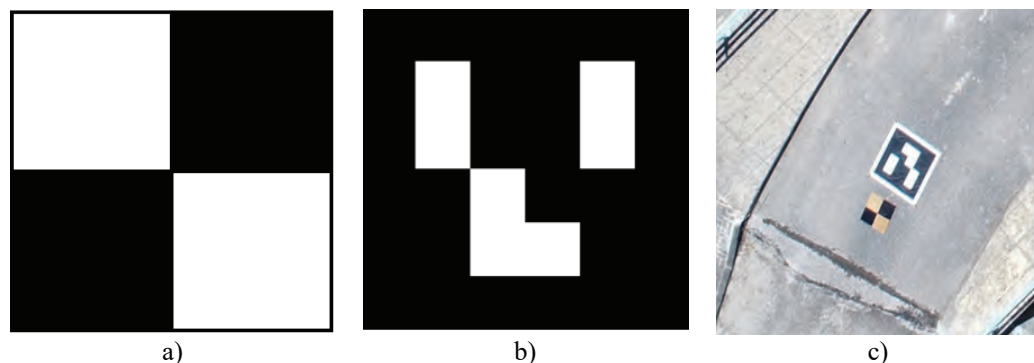


Fig. 9 – Modelos de GCP.

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*TM (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 detecção automática de marcadores *ArUco* em imagens aéreas captadas por drones. A aplicação identifica automaticamente a localização destes marcadores em coordenadas de pixels 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).

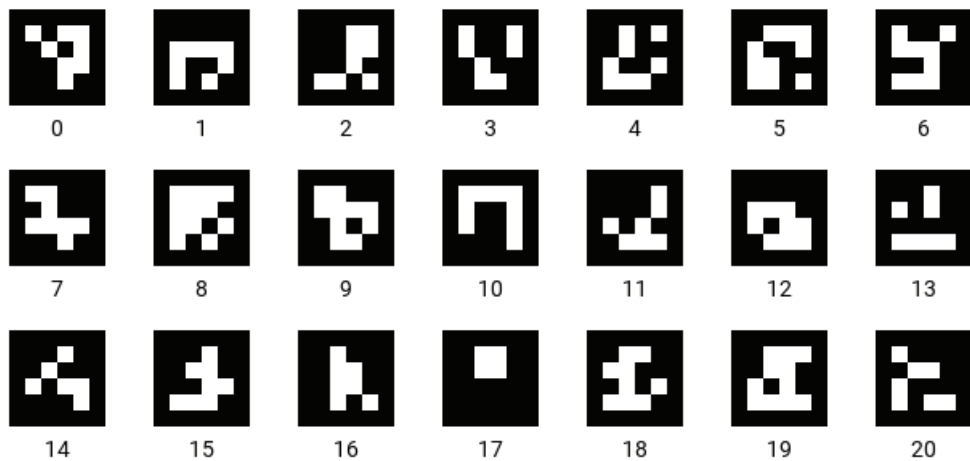


Fig. 12 – Modelos de marcadores *ArUco*.

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).

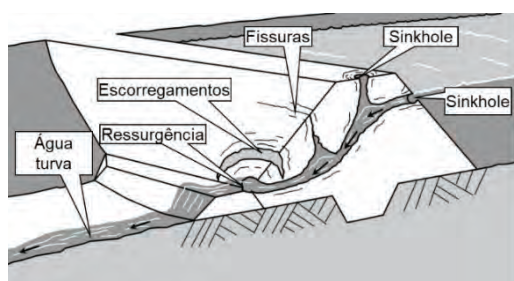


Fig. 13 – Erosão interna (*piping*) em aterros.

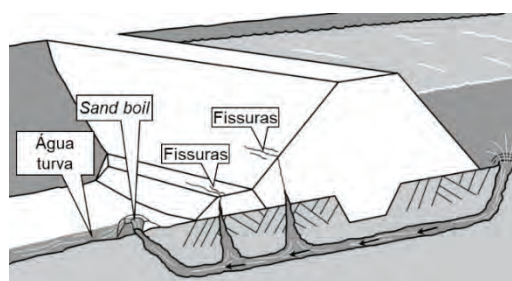


Fig. 14 – Erosão interna em fundações.

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).

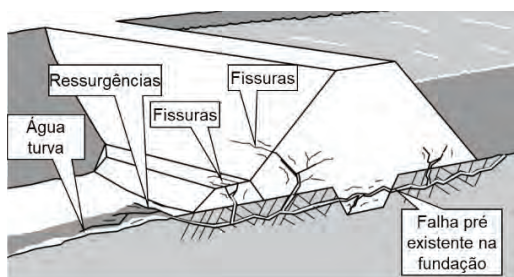


Fig. 15 – *Piping* em fraturas.

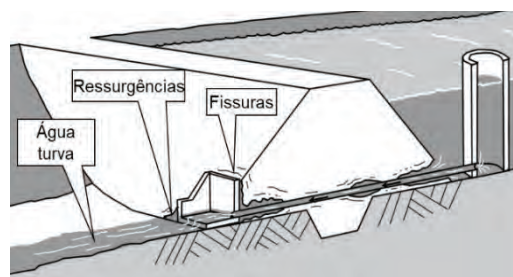


Fig. 16 – *Piping* entre solo e estrutura.

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).

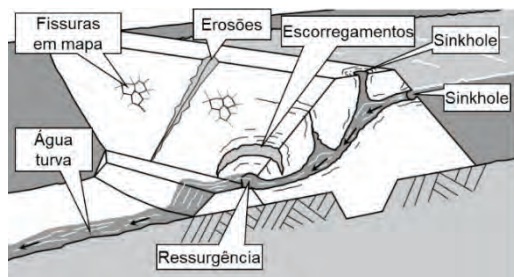


Fig. 17 – Piping em solos dispersivos.

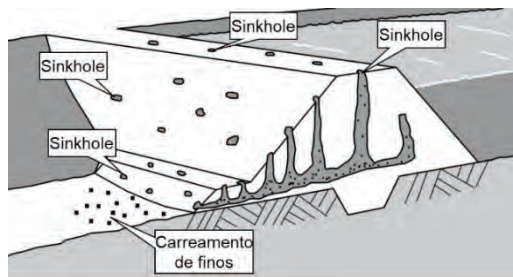


Fig. 18 – Piping por sufusão.

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).

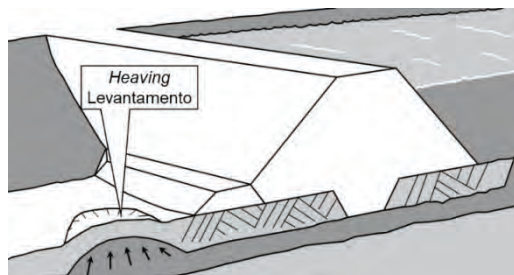


Fig. 19 – Levantamento (*heaving*).

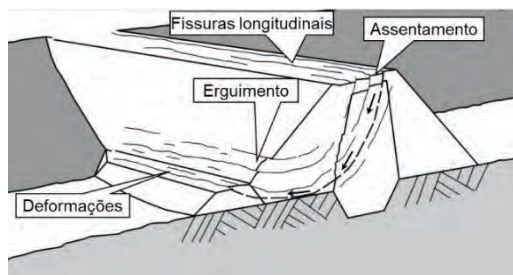


Fig. 20 – Excesso de pressão intersticial.

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).

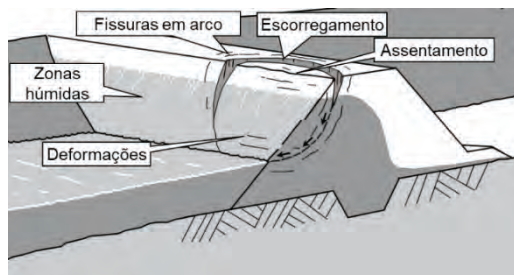


Fig. 21 – Rebaixamento rápido da albufera.

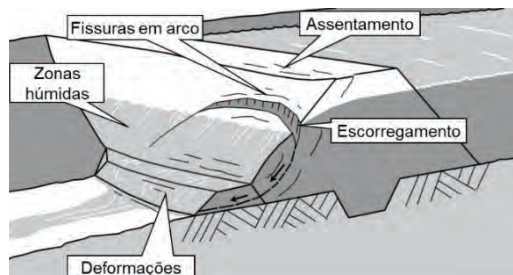


Fig. 22 – Sistema de drenagem deficiente.

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).

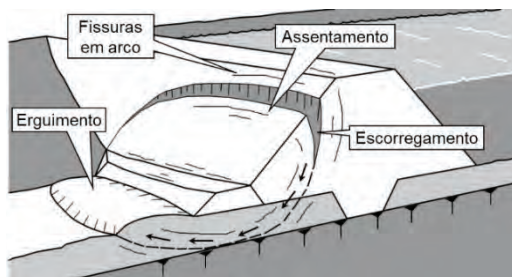


Fig. 23 – Instabilidade por corte na fundação.

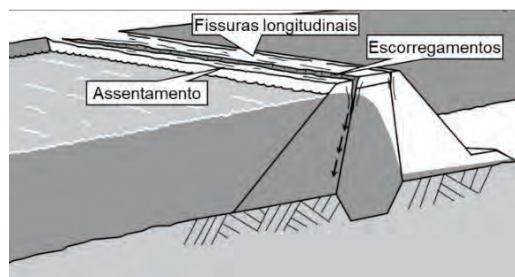


Fig. 24 – Perda da folga por assentamentos.

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).

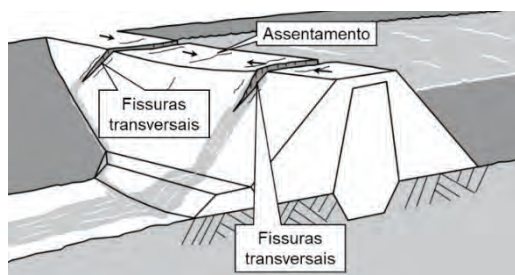


Fig. 25 – Perda da folga por fissuras.

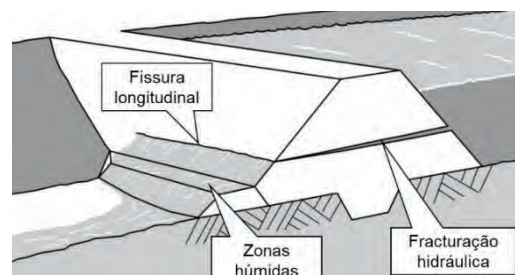


Fig. 26 – Fracturação hidráulica.

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 albufera 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.

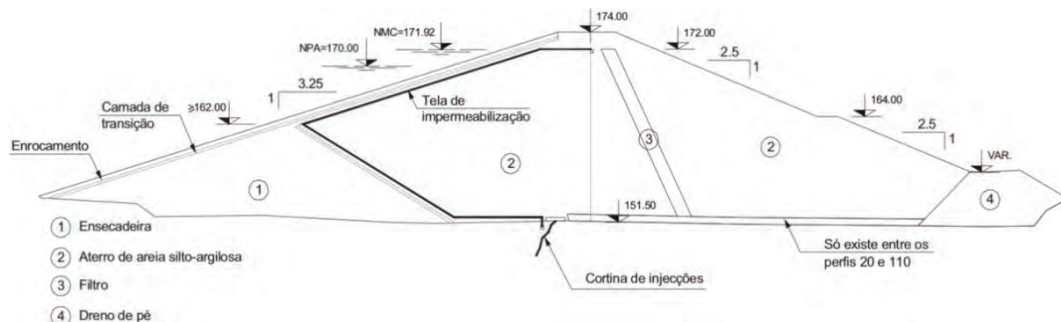


Fig. 27 – Secção transversal tipo da barragem da Lapa.

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.

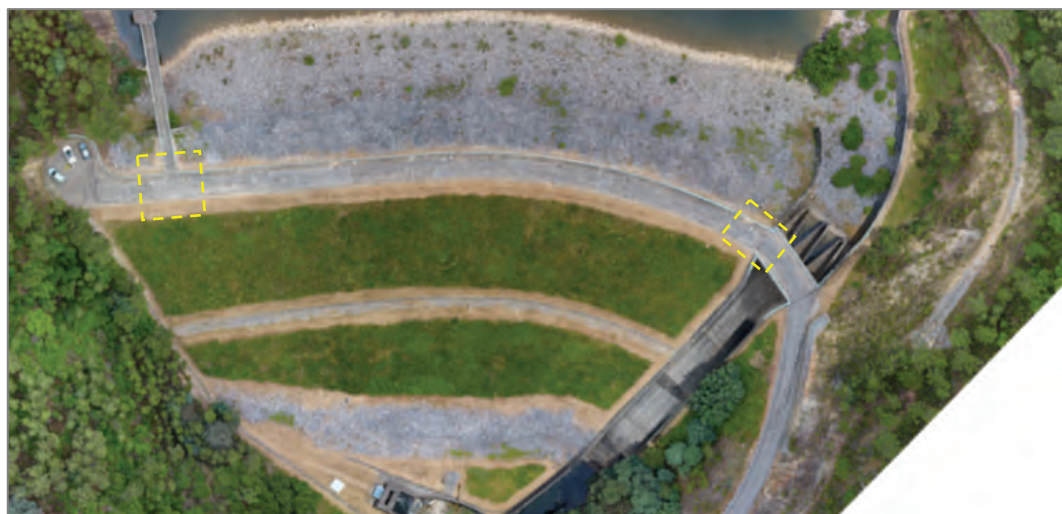


Fig. 31 – Localização da zona onde ocorrem fissuras no coroamento, junto ao passadiço de acesso a tomada de água e junto ao passadiço do descarregador.

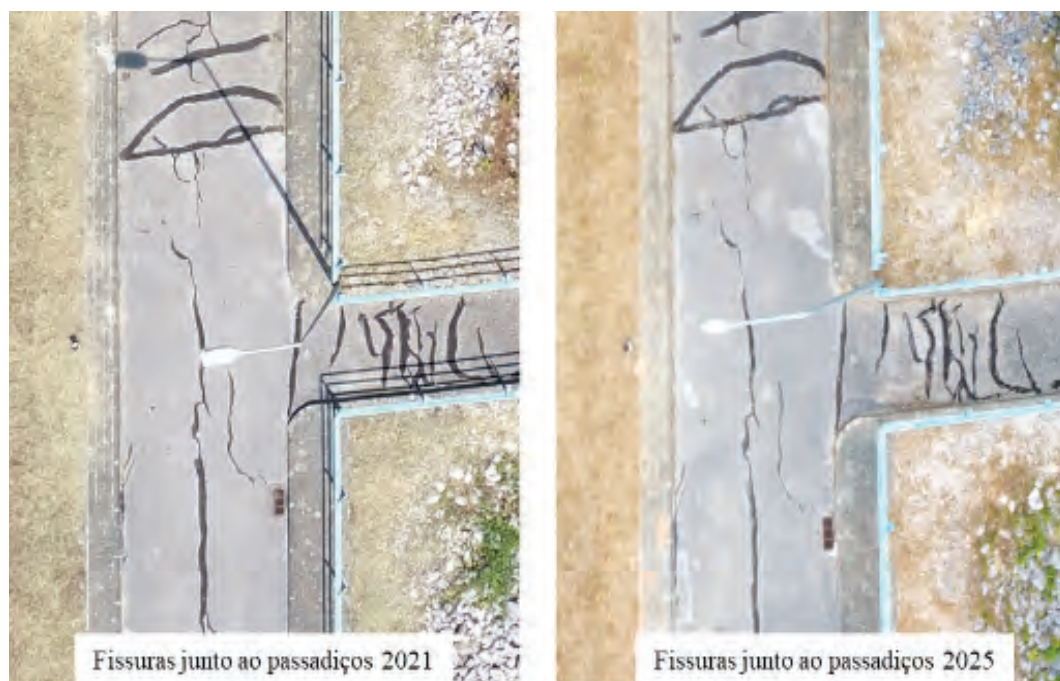


Fig. 32 – Fendas no coroamento, junto ao passadiço de acesso a tomada de água. Comparação entre as campanhas de 2021 e 2025.



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.

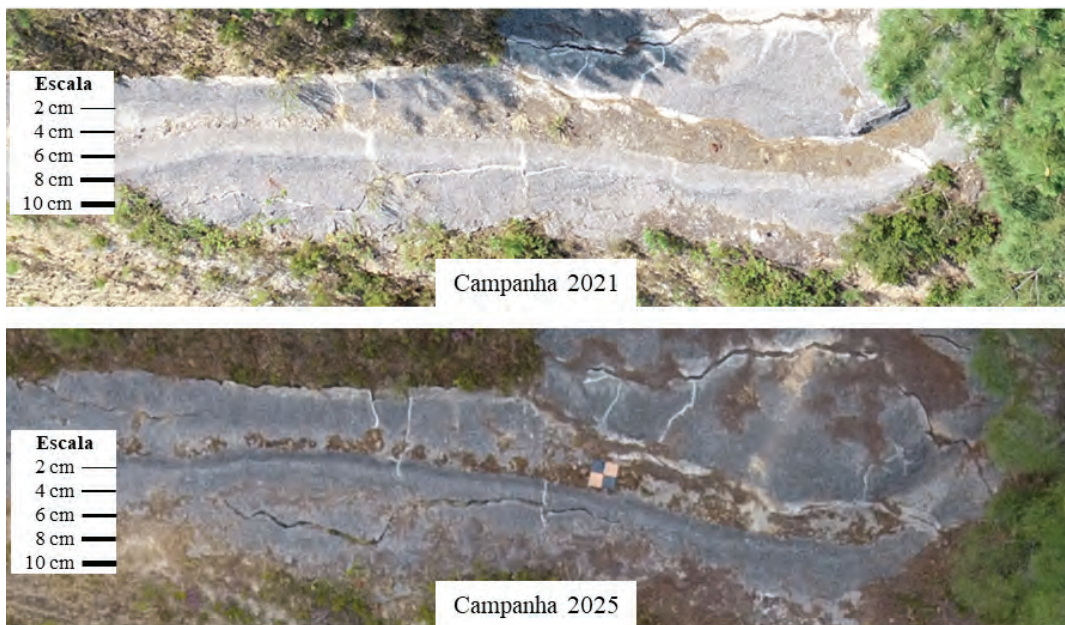


Fig. 37 – Fissuras na calceira do talude de escavação junto ao descarregador.
Comparação entre as campanhas de 2021 e 2025.

No que se refere à comparação entre os modelos tridimensionais, a Figura 38 apresenta as ortofotos das 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.

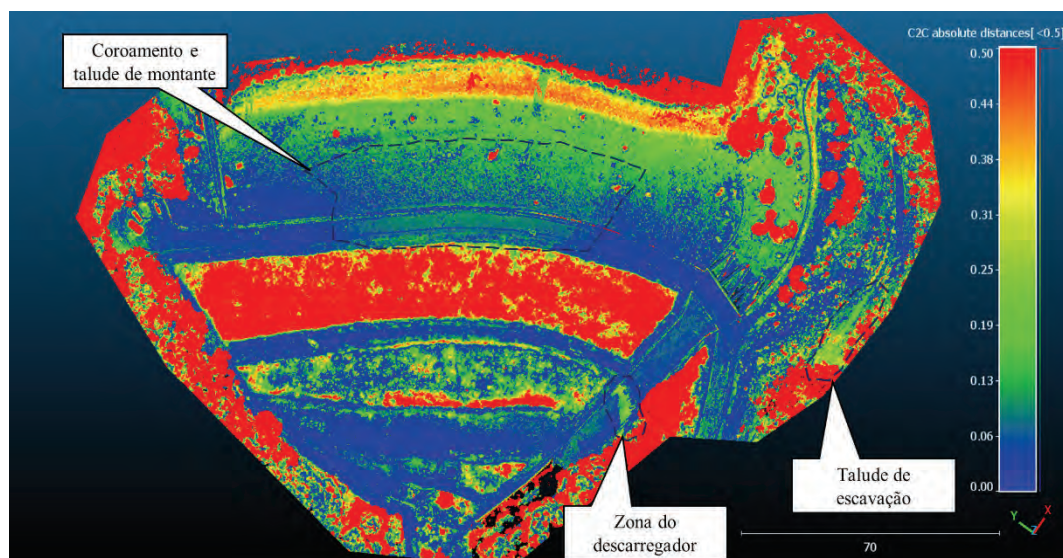


Fig. 39 – Comparação entre nuvens de pontos das campanhas de 2021 e 2025 (CloudCompare).

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 Convulsionais 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 I 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*. Painele: 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_EvalMonitorSeepageInternalErosionP1032-2015.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.ufm.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/files/2/1720458755/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.

EL ENSAYO DE PENETRACIÓN DINÁMICA DE ENERGÍA VARIABLE PARA ESTIMAR LA CALIDAD DE LA BANQUETA DE BALASTO

Variable energy dynamic penetration test to estimate quality of ballast bed

Natalia Montero-Cubillo^a, José Estaire^a

^a Laboratorio de Geotecnia, CEDEX, Madrid, España.

RESUMEN – Este artículo estudia el ensayo de penetración dinámica de energía variable tipo Panda, para determinar el estado de compactación de la banqueta de balasto en vías ferroviarias. Una baja compactación de la banqueta de balasto puede derivar en movimientos excesivos en elementos como la traviesa y los carriles. Se realizaron en laboratorio quince ensayos Panda en balasto limpio con el objetivo de calibrar los valores de resistencia del ensayo a distintos pesos específicos conocidos. Posteriormente, se recopilieron ensayos Panda realizados en el Cajón Ferroviario del CEDEX y en vías ferroviarias reales españolas que permitieron comprobar la utilidad de dicha calibración. Merced a estos resultados propios y a las relaciones peso específico-resistencia de diferentes autores, se establece una propuesta de valores admisibles de la resistencia medida con el ensayo Panda para varios estados de compactación de la banqueta de balasto.

ABSTRACT – This article examines the Panda variable energy dynamic penetration test to assess ballast bed compactness on railway tracks. Low ballast compaction can cause excessive movement in sleepers and rails. Fifteen Panda tests were carried out in laboratory on clean ballast with the aim of calibrating the test resistance values at different known specific weights. Subsequently, Panda tests performed in the CEDEX Track Box and on actual Spanish railway tracks were compiled, which made it possible to verify the usefulness of this calibration. Thanks to their own results and the specific weight-resistance relationships of different authors, a proposal for acceptable values of the resistance measured with the Panda test for various states of ballast bed compactness is established.

Palabras Clave – balasto ferroviario, resistencia dinámica por punta, Panda, compactación, peso específico.

Keywords – railway ballast, cone penetration, Panda, compactness, specific weight.

1 – INTRODUCCIÓN

1.1 – Antecedentes y objeto

El balasto ferroviario es un material granular y uniforme, formado principalmente por partículas angulosas de entre 30 y 50 mm de diámetro. Procede de rocas con una elevada resistencia, peso específico y durabilidad. La renovación de la banqueta de balasto es una de las operaciones de mantenimiento más importantes en términos de costes. A este respecto, la caracterización del estado

E-mails: natalia.montero@cedex.es (N. Montero-Cubillo), jose.estaire@cedex.es (J. Estaire)

ORCID: orcid.org/0000-0003-0278-1931 (N. Montero-Cubillo), orcid.org/0000-0002-9606-6180 (J. Estaire)

mecánico del balasto ferroviario es un trabajo fundamental para optimizar la toma de decisiones en dichas operaciones de mantenimiento (Saussine et al. 2017). El problema es que resulta complejo encontrar técnicas que estimen el grado de desgaste de las partículas, dadas sus características granulométricas, o del estado de compacidad in situ de la banqueta de balasto, dadas sus dimensiones.

Por otra parte, los ensayos de penetración dinámica son técnicas utilizadas mundialmente para la caracterización de una gran cantidad de terrenos por su rápida implementación y facilidad de ejecución (Benz-Navarrete et al. 2019). Entre los ensayos dinámicos se encuentran los de energía variable que permiten su adaptación a diferentes tipos de terreno, posibilitando el ensayo de terrenos de mayor granulometría, como es el caso del balasto. Uno de los ensayos de penetración dinámica más empleados en Francia para la gestión del mantenimiento del balasto ferroviario es el ensayo de penetración dinámica de energía variable, comúnmente conocido como ensayo Panda (Haddani et al. 2016), cuyas siglas significan “*Pénéromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté par ordinateur*”. Se trata de un equipo único en el mercado ya que aplica una energía variable que es registrada en cada golpe mediante la instrumentación de la que dispone. Los resultados tienden a mostrar que la energía de penetración registrada está relacionada con el estado mecánico del balasto en el emplazamiento y con el estado de compacidad de la banqueta en su conjunto.

El objetivo del artículo es establecer unos valores admisibles de la resistencia dinámica por punta medida con el ensayo Panda para varios estados de compacidad de la banqueta de balasto. Para ello, el trabajo ha consistido en el análisis de numerosas referencias bibliográficas y de 73 ensayos realizados por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX (LG-CEDEX, de ahora en adelante) en diferentes situaciones: en laboratorio con probetas de balasto a peso específico controlado, y en la banqueta de balasto de vías reales y de los modelos a escala real del Cajón Ferroviario del CEDEX (CFC de ahora en adelante, Estaire et al. 2017).

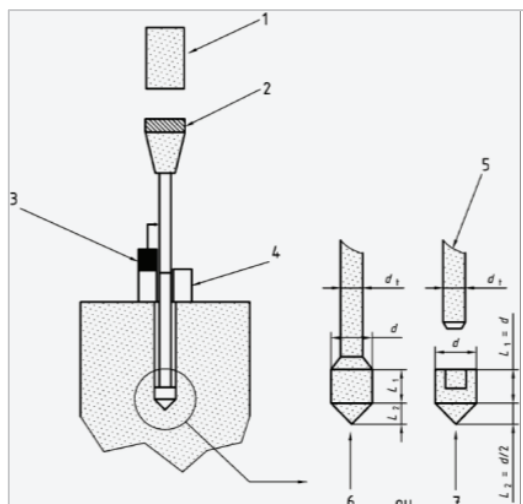
1.2 – Descripción del ensayo de penetración dinámica de energía variable

El ensayo de penetración dinámica de energía variable o ensayo Panda fue creado en 1989 por R. Gourvès (Gourvès, 1991). Consiste en hincar manualmente en el terreno, una sarta de varillas que va unida a una punta cónica, para medir la resistencia dinámica por punta de dicho terreno hasta la profundidad deseada. El campo de utilización cubre terrenos que tengan hasta 80 mm de diámetro máximo de partículas.

Un esquema de los distintos componentes del equipo se puede ver en la Figura 1a y en la Figura 1b a punta con cada golpe y de la profundidad alcanzada por la punta, varilla porta-punta, guía de las varillas, puntas de 2 y 4 cm², unidad central de adquisición y terminal de diálogo. El LG-CEDEX dispone del equipo Panda 2.0. del que se puede apreciar una fotografía en la Figura 1b. Todos los ensayos presentados en este trabajo se realizaron con la punta cónica de 2 cm² de sección, adecuada para suelos granulares gruesos, como el balasto.

En el cabezal del tren de varillas, la energía de hincas se obtiene del golpe de un martillo. Esa energía se transmite en parte a la punta que, con cada golpe, va a penetrar una determinada profundidad en el terreno, variable según la resistencia del terreno a la penetración dinámica. En cada golpe de martillo, la energía se mide en el cabezal del tren de varillas a través de bandas extensiométricas. Otros sensores miden la penetración de la punta por golpe. El sistema de adquisición recibe ambas lecturas y calcula la resistencia dinámica por punta, q_d , mediante la siguiente expresión [fórmula holandesa modificada o fórmula de Engineering News (Sanglerat, 1972)]:

$$q_d = E \frac{M}{Ae'(M + P)} \quad (1)$$



1	Dispositivo de hincia (martillo)	4	Guía de las varillas
2	Dispositivo de medición de la energía proporcionada en cada impacto	5	Varilla porta-punta
3	Dispositivo de medición:	6	Punta fija
—	hundimiento de la punta con cada golpe	0	
—	profundidad alcanzada por la punta	7	Punta perdida



a) Esquemas del equipo (NF P 94-105 [6])

b) Fotografías del equipo Panda 2.0 del LG-CEDEX

Fig. 1 – Partes del equipo de ensayo Panda.

donde:

E – energía aportada al sistema (expresada en julios);

e' – penetración de la punta por golpe (expresado en metros);

M – masa de golpeo (expresada en kilogramos);

A – sección de la punta (expresada en metros cuadrados);

P – masa del cabezal de golpeo + varillas + punta (expresada en kilogramos).

Las hipótesis que se han utilizado para la obtención de la Ecuación 1 son:

- que el terreno tiene un comportamiento elasto-plástico perfecto durante la penetración;
- que el rozamiento lateral en el tren de varillas es despreciable;
- que la energía suministrada por el martillo durante el ensayo es totalmente transmitida a la punta mediante el dispositivo de hincia, por lo que se considera que en cada golpe no se produce ningún rozamiento; y
- que se debe poder despreciar el posible incremento de presión intersticial que se genere en el terreno debido a la hincia, por lo que el equipo no se debe utilizar en terrenos saturados, sensibles al agua.

Este ensayo se encuentra normalizado a través de la norma francesa NF P 94-105, en la que se indica que el ensayo es adecuado para:

- evaluar el espesor de las capas o tongadas de terreno (función A);
- verificar que se alcanza el objetivo de densificación buscado (función B). En tal caso, hay que clasificar los materiales empleados, conocer los objetivos de densificación y el estado de humedad de los materiales en el momento de las pruebas de control;
- verificar que la compactación se ajusta a lo obtenido en los ensayos de referencia específicos en el emplazamiento de la obra (función C).

El ensayo tiene ciertas limitaciones relativas a la profundidad a la que puede llegarse en los ensayos, en función de la naturaleza de los materiales atravesados y de los equipos utilizados. El ensayo debe detenerse cuando:

- no se haya obtenido una penetración por golpe de más de 1 mm, durante cinco golpes seguidos,
- el rozamiento lateral entre el material y el tren de varillas sea excesivo, aspecto que se puede determinar cuando no sea posible hacer girar la sarta de varillas con una sola mano.

Por otra parte, la norma NF P 94-105 recomienda que, durante la realización del ensayo, el valor de penetración por golpe se mantenga entre 2 y 20 mm, para que se verifiquen, sin errores apreciables, las hipótesis de aplicación de la Ecuación 1. Como se puede apreciar en la Figura 2, de acuerdo con Chaigneau (2001), el error relativo por debajo de 2 mm de hincas es muy alto, por lo que dicho valor de 2 mm se configura como el límite inferior admisible en estos ensayos.

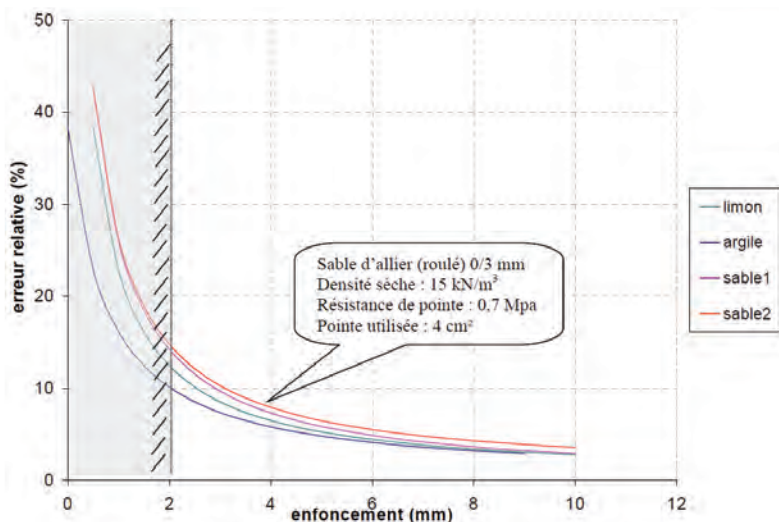


Fig. 2 – Error relativo en la resistencia dinámica por punta en función de la hincas (Chaigneau, 2001).

Por último, la resistencia dinámica por punta, medida con el ensayo Panda en banquetas de balasto, presenta variaciones significativas, en función del lugar donde se lleve a cabo el ensayo en la vía: en el eje de vía, debajo del carril, próximo a ambos lados del carril o en el hombro. Sin embargo, cuando las pruebas se realizan en el mismo lugar de la vía y en condiciones semejantes se observa una buena repetitividad de los resultados obtenidos en términos de resistencia dinámica por punta. Los resultados tienden a mostrar que la resistencia dinámica por punta está relacionada con

el estado mecánico y la compacidad de la banqueta de balasto en el emplazamiento (Breul e Saussine, 2011).

1.3 – Interpretación de los resultados de los ensayos

Los resultados de resistencia dinámica por punta (q_d) de los ensayos Panda se suelen representar en un gráfico en función de la profundidad alcanzada (z), denominado “penetrograma”. Como se puede observar en la Figura 3a, un penetrograma se puede esquematizar, en coordenadas semi-logarítmicas, en una relación bilineal con tres parámetros: resistencia en superficie (q_0); profundidad crítica (z_c) y resistencia dinámica representativa por punta (q_1). De esta manera, en un terreno homogéneo, con la misma humedad y peso específico (γ_d), y suponiendo que no hay rozamiento lateral, la resistencia a la penetración dinámica aumenta desde un valor q_0 en la superficie hasta un valor considerado constante en profundidad (q_1) obtenido a partir de una profundidad crítica (z_c). La profundidad crítica depende del estado de compacidad del terreno, del tamaño de sus partículas y del diámetro de la punta utilizada en el ensayo.

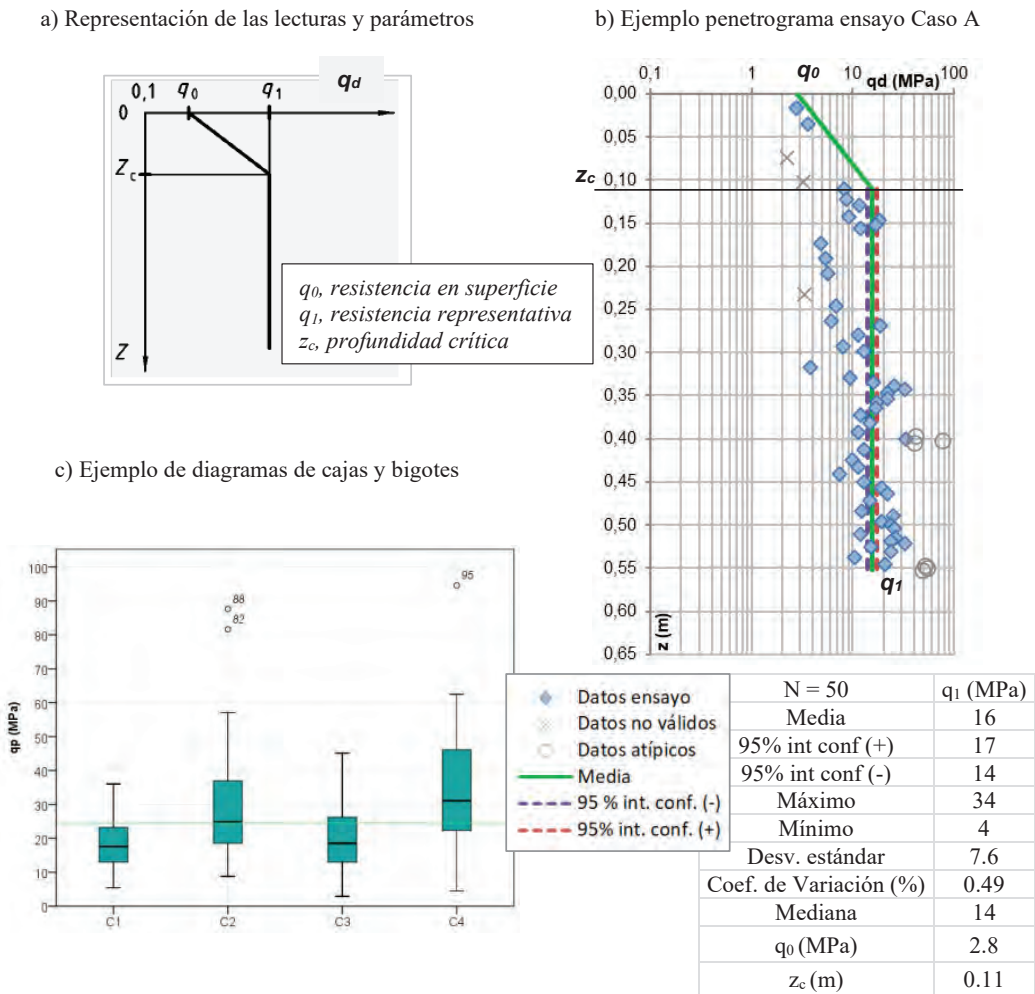


Fig. 3 – a) Representación esquemática de las lecturas del ensayo Panda, b) representación de un ensayo Panda real y c) ejemplo de diagramas de cajas y bigotes para filtrado de resultados.

El procedimiento de interpretación de los resultados del ensayo se ha llevado a cabo según los siguientes pasos, basados en la norma NF P 94-105 y en un procedimiento propio creado por el LG-CEDEX que tiene en cuenta la elevada variabilidad de los resultados cuando se ensayan materiales con partículas de gran tamaño como el balasto.

1. Representación, en escala logarítmica, de los valores de resistencia dinámica por punta (q_d) en función de la profundidad z , en escala natural, (Figura 3b).
2. Cálculo de la penetración de la punta en cada golpe. Se eliminan todos aquellos valores de penetración por golpe mayores a 20 mm e inferiores a 2 mm (Chaigneau, 2001) considerados como “No válidos”, como se indica en la Figura 3.
3. Detección preliminar, a simple vista, de si hay uno o varios niveles de balasto diferenciados, para llevar a cabo los pasos 6 a 9, para cada nivel por separado.
4. Cálculo de q_0 como el valor promedio de q_d en los primeros 5 mm de profundidad. En el caso del balasto es habitual que el primer golpe supere una penetración de 5 mm, por lo que se suele usar el primer valor de q_d como q_0 . Es el único caso en el que se considera válido un valor de penetración por golpe superior a 20 mm.
5. Elección de la profundidad crítica (z_c), observando el aspecto del penetrograma. Esta profundidad se considera como la profundidad a partir de la cual se alcanza un valor de la resistencia por punta bastante constante en profundidad, denominado como “ q_1 ” (Figura 3a y Figura 3b).

Los resultados obtenidos cuando se ensayan materiales como el balasto, con grandes diámetros de partículas, suelen presentar bastante variabilidad debido, por un lado, al paso de las varillas por zonas huecas, con valores de q_d muy bajos o incluso nulos y, por otro lado, a la rotura de partículas con valores de q_d de hasta 100 MPa. Teniendo en cuenta este hecho, en LG-CEDEX se ha optado por realizar una interpretación estadística de los resultados que incluye la eliminación previa de valores atípicos y singulares, cuyos pasos son los siguientes:

6. Realización de un diagrama de cajas y bigotes únicamente con los valores de q_d obtenidos a profundidades superiores a z_c , (Figura 3c) que permite, además de visualizar la variabilidad de los resultados, determinar los valores atípicos y singulares. Se consideran atípicos los valores inferiores a $Q_1 - 1,5 \cdot \text{RIC}$ o superiores a $Q_3 + 1,5 \cdot \text{RIC}$, siendo Q_1 el primer cuartil (límite inferior de la caja por debajo del cual se encuentran el 25 % de los datos); Q_3 el tercer cuartil (límite superior de la caja por encima del cual se encuentran el 25 % de los datos) y; RIC el rango intercuartílico (rango de valores que comprenden el 50 % de los datos). Se consideran valores singulares aquellos superiores a $Q_1 + 3 \cdot \text{RIC}$.
7. Eliminación de los valores atípicos y singulares encontrados. Estos valores eliminados engloban los datos que se consideran debidos a la rotura de partículas de balasto durante la ejecución del ensayo (usualmente con valores superiores a 100 MPa).
8. Determinación de q_1 (Figura 3b), que se calcula, tras el proceso del punto anterior, como el valor medio de q_d desde la profundidad crítica (z_c) hasta la profundidad final alcanzada con el ensayo o hasta la profundidad a la que se considere que acaba el nivel que se esté interpretando.
9. Indicación de los resultados estadísticos del ensayo, relativos a los valores q_d a partir de z_c : el número de datos considerados (N), la media, el intervalo de confianza del 95 % respecto a la media calculada, los valores máximos y mínimos, la desviación estándar, la mediana y el coeficiente de variación (COV) (Figura 3b). Se debe tener en cuenta que, en ciertos registros, la mediana puede ser más representativa del ensayo que la media. Por otra parte, también hay que considerar que un COV habitual en un ensayo en una capa de terraplén, compuesta por material térreo fino, suele ser inferior a 0,3, mientras que, en los ensayos en

una banqueta de balasto, el COV suele ser superior a 0,4, hecho que refleja la mayor variabilidad de los resultados en los ensayos con balasto.

2 – ENSAYOS REALIZADOS

La Tabla 1 recoge los trabajos efectuados por LG-CEDEX en los que se realizaron ensayos Panda en balasto, incluyendo información sobre la localización del trabajo, su denominación, el número de ensayos realizados, el tipo de balasto ensayado y algunas observaciones explicativas. En estos trabajos se realizaron 73 ensayos que son los analizados en este artículo.

Tabla 1 – Resumen de ensayos Panda realizados en balasto por LG-CEDEX.

Localización	Caso - Denominación	Número	Observaciones
Laboratorio	A – Molde cilíndrico	3	Vertido (para obtención de γ_d mínima)
		2	Compactado en capas de 5 cm de espeso (para obtención de γ_d máxima)
		1	Compactado en capas de 20 cm de espesor (para obtención de γ_d intermedia)
	B – Molde paralelepípedo	6	Vertido (para obtención de γ_d mínima)
		3	Compactado en capas de 5 cm de espesor (para obtención de γ_d máxima)
Vía real (LAVs, España)	C – Alhama de Aragón	4	Sección LAV. Banqueta de balasto entre 1 y 1,7 m de espesor
	D – Brihuega 2021	4	Sección LAV. Banqueta de balasto de 50 cm de espesor
	M - Brihuega 2022	8	Sección LAV. Banqueta de balasto de 50 cm de espesor
	N – Quintana del Puente	6	Sección LAV recién puesta en servicio
Cajón Ferroviario del CEDEX (CFC)	E – Haramain 2015	2	Sección de balasto contaminado con arena
	F - junio 2019	5	Sección LAV. Tras primer bateo
	G - julio 2020	5	Sección LAV. Sin actuaciones en el balasto
	H - febrero 2021	6	Sección LAV. Estabilización (500000 Tn)
	I - julio 2021	11	Sección LAV. Ensayos dinámicos (1560000 Tn)
	J - octubre 2021	7	Sección LAV. Ensayos dinámicos (1560000 Tn)

Notas: Todos los ensayos se llevan a cabo en balasto ferroviario empleado en LAVs españolas.

Los ensayos realizados en laboratorio se hicieron para obtener una relación entre los resultados de la resistencia dinámica por punta y el peso específico de la banqueta de balasto, lo que se ha denominado como “calibración” en el Anexo C de la norma NF P 94-105 “Método de calibrado del penetrómetro dinámico de energía variable en laboratorio”. Para ello, se llevaron a cabo 15 ensayos en condiciones controladas: en el Caso A (Tabla 1), se realizaron seis ensayos en un molde cilíndrico metálico de 40,5 cm de diámetro y 62 cm de altura (Figura 4a) con tres pesos específicos diferentes (14,5, 15,2 y 16,5 kN/m³) y; en el Caso B, se realizaron nueve ensayos en un molde paralelepípedo de 120 × 80 × 76 cm (largo × ancho × alto) (Figura 4b) con dos pesos específicos diferentes (14,9 y 16,2 kN/m³). Los ensayos del Caso B se llevaron a cabo para estudiar si existía una sobrestimación de la resistencia en el Caso A ya que en el Anexo C de la norma NF P 94-105 se establece que el molde de pruebas debe tener dimensiones suficientes como para que la prueba de penetración se pueda considerar efectuada en un medio semi-infinito. La relación entre el diámetro del molde y el de la punta del Caso A es de 25, valor que para algunos autores podría ser insuficiente; Breul & Saussine (2011) y Zhou (1997) recomiendan una relación superior a 30, siendo 48 para los ensayos realizados en el molde paralelepípedo (Caso B).



Fig. 4 – a) Representación esquemática de las lecturas del ensayo Panda, b) representación de un ensayo Panda real y c) ejemplo de diagramas de cajas y bigotes para filtrado de resultados.

Por otra parte, la recopilación y el análisis de los ensayos llevados a cabo en vías ferroviarias reales por el LG-CEDEX permiten establecer algunas conclusiones sobre la resistencia habitual en vía real y su evolución en profundidad. En este estudio se cuenta con cuatro campañas:

- la primera campaña (Caso C – Alhama de Aragón, Tabla 2), realizada en la LAV Madrid-Barcelona, cerca de la localidad de Alhama de Aragón, consta de cuatro ensayos Panda ejecutados en una banqueta de balasto de unos 40 cm, que se colocó para recrear una banqueta de balasto existente que ya tenía entre 60 cm y 130 cm de espesor;
- la segunda campaña (Caso D – Brihuega 2021, Tabla 1) efectuada también en la LAV Madrid-Barcelona, cerca de la localidad de Brihuega, consta de cuatro ensayos Panda ejecutados en una banqueta de balasto de unos 50 cm de espesor total;
- la tercera campaña (Caso M – Brihuega 2022, Tabla 1) realizada también cerca de la localidad de Brihuega en la LAV Madrid-Barcelona, en un PK próximo al del punto anterior pero no en el mismo, consta de ocho ensayos Panda ejecutados en una banqueta de balasto de unos 50 cm de espesor total y
- la cuarta campaña, llevada a cabo en la LAV Madrid-Burgos, cerca de la localidad de Quintana del Puente, consta de seis ensayos Panda efectuados en una vía recién puesta en servicio, por lo tanto, sin apenas uso, con espesores totales de hasta 80 cm de balasto.

Por último, se analizan los ensayos realizados en el Cajón Ferroviario del CEDEX (CFC), que es una instalación en la que se pueden ensayar modelos de una vía ferroviaria, a escala 1:1 y que permite la simulación del paso de trenes en unas condiciones muy similares a las de la vía real. Hay que tener en cuenta que la experiencia acumulada permite indicar que en el CFC la banqueta de balasto se encuentra generalmente en un estado de compacidad inferior al de la vía real por la imposibilidad de utilizar una estabilizadora y llegar con la bateadora a ciertas zonas de la banqueta. Por esta razón es esperable que el peso específico y, por tanto, la resistencia dinámica por punta de la banqueta de balasto obtenida con el ensayo Panda sea algo inferior a la obtenida en vías reales. Sin embargo, el análisis de los ensayos Panda realizados en esta instalación permite obtener mayor cantidad de resultados próximos a las condiciones en vía real, conocer el estado de la capa en la instalación, partiendo de las premisas mencionadas y, por ejemplo, establecer algunas conclusiones respecto a la variación en el estado de compacidad con la contaminación con arena. Los ensayos en

el CFC se realizaron en el periodo 2008-2021 en distintas ubicaciones dentro de la banqueta de balasto de los distintos modelos de ensayo construidos en la instalación (Casos E- I de la Tabla 1).

3 – RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

3.1 – Ensayos en laboratorio

En la Figura 5a se representan los valores de resistencia dinámica representativa por punta (q_1) en función del peso específico (γ_d) de cada uno de los ensayos realizados en laboratorio, tanto en el caso del molde cilíndrico como en el caso del molde paralelepédico.

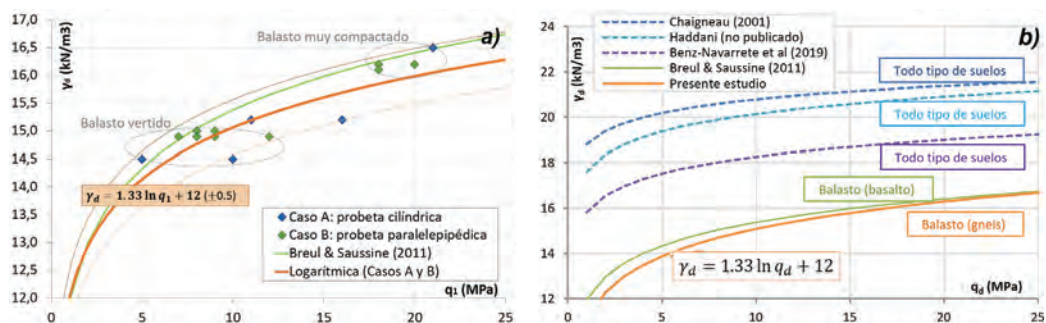


Fig. 5 – a) Resultados de q_1 y γ_d en los Casos A y B, junto con la curva de mejor ajuste a los datos y; b) Curvas de calibración según distintos autores y tipos de suelo.

Las probetas realizadas en este trabajo con ambos moldes (cilíndrico y paralelepédico), cuando el balasto se colocó directamente vertido, tuvieron pesos específicos (γ_d) entre 14,5 y 14,9 kN/m³ y presentaron resistencias (q_1) entre 5 y 12 MPa, estando el valor medio, para ambos casos, en unos 8-9 MPa. Por el contrario, en los ensayos realizados en ambos tipos de moldes, cuando el balasto se colocó en capas de muy poco espesor, se alcanzaron pesos específicos entre 16,2 y 16,5 kN/m³ y valores de q_1 entre 18 y 21 MPa, respectivamente. Los resultados demuestran que la resistencia que se obtiene mediante el ensayo Panda es claramente dependiente del peso específico del balasto, de tal manera que, entre una muestra directamente vertida y una muy compactada en capas de poco espesor, la resistencia por punta llega a duplicarse.

Respecto a las diferentes dimensiones de los moldes empleados en los Casos A y B, no se han apreciado diferencias destacables, razón por la que se han empleado los datos de ambos casos para calcular la curva de calibración de la Figura 5a. Chaigneau (2001) y Breul & Saussine (2011) establecieron que para una clase de terreno y una humedad fija existe una relación entre γ_d y q_d , dada por una expresión logarítmica, [$\gamma_d = A \ln(q_d) + B$]. Así, Benz-Navarrete (2009) determinó, para un balasto procedente de un basalto, la curva de calibración en laboratorio de una manera semejante a la que se presenta en este trabajo. Algunas de las curvas citadas se representan en la Figura 5b, junto con la ecuación $\gamma_d - q_d$, obtenida a partir de los resultados de los ensayos en laboratorio presentados en este artículo. Para el caso del balasto, se puede apreciar que los resultados mostrados en este artículo son prácticamente coincidentes con la curva propuesta por Benz-Navarrete (2009) para un balasto de origen basáltico. Esta semejanza permite pensar que existe una única relación entre γ_d y q_d para balastos de alta calidad, como los empleados en este estudio y en el llevado a cabo por Benz-Navarrete (2009). La ecuación de calibración obtenida en el presente estudio, junto con su rango de incertidumbre, es:

$$\gamma_d = 1.33 \ln(q_1) + 12 (\pm 0.5) \quad (2)$$

3.2 – Ensayos en vías ferroviarias reales

En este apartado se lleva a cabo un análisis de las diferentes campañas de ensayos Panda realizados por el LG-CEDEX en vía real, descritas anteriormente en el Capítulo 2, cuyos resultados representativos se muestran en la Figura 6.

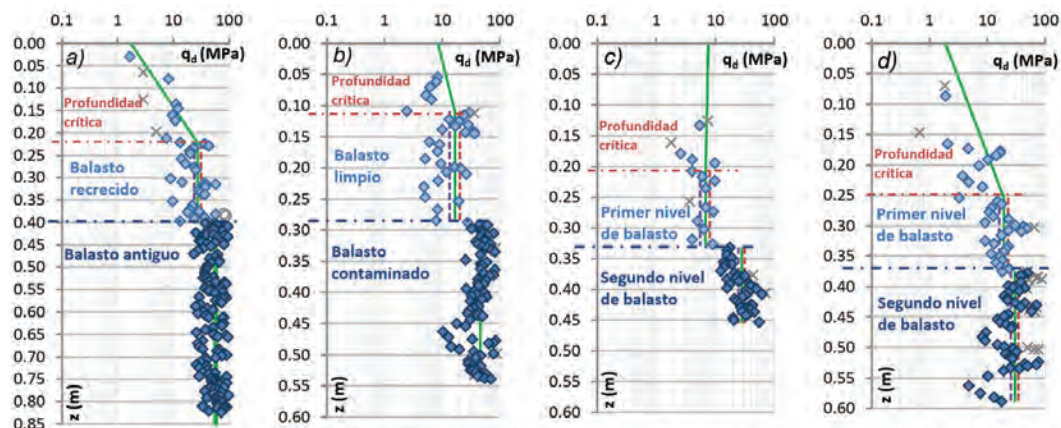


Fig. 6 – Ejemplos de penetrogramas obtenidos en vías reales: a) Alhama de Aragón (Caso C), b) Brihuega 2021, Caso D, c) Brihuega 2022 (Caso M) y, d) Quintana del Puente (Caso N).

- Los resultados obtenidos en los cuatro ensayos Panda llevados a cabo en la LAV Madrid-Barcelona, cerca de la localidad de Alhama de Aragón (Caso C, Tabla 1) permiten establecer que el valor de resistencia dinámica representativa por punta (q_1) para la banqueta de balasto, en un tramo comprendido entre la superficie y 40 cm de profundidad, es de 25 MPa. En algunos ensayos, a partir de esos 40 cm hasta 1 m de profundidad, que se corresponden con la antigua banqueta de balasto sobre la que se recrecieron los 40 cm, se observaron aumentos de la resistencia (como el que se aprecia en la Figura 6a mientras que en otros ensayos la resistencia disminuía, lo que impidió sacar conclusiones claras sobre el estado de la banqueta de balasto existente.
- Por su parte, los resultados obtenidos en los cuatro ensayos Panda llevados a cabo en la LAV Madrid-Barcelona, cerca de la localidad de Brihuega en 2021 (Caso D, Tabla 1), de los cuales en la Figura 6b se muestra el penetrograma de uno de ellos, permiten establecer que el valor de q_1 para una banqueta de balasto limpio o no contaminado, en condiciones de compactación normales en vía, es de unos 23 MPa. Además, a partir de los 25-30 cm e profundidad se detectó un nivel de mayor resistencia, con un valor de q_1 de unos 40-45 MPa que se asoció, en este caso, a la contaminación del balasto a partir de esa profundidad, tal y como se indica en la Figura 6b.
- Así mismo, los resultados obtenidos en los ocho ensayos Panda llevados a cabo también en la LAV Madrid-Barcelona, cerca de la localidad de Brihuega, pero en 2022 (Caso M, Tabla 1), se ejemplifican en el penetrograma de uno de ellos mostrado en la Figura 6c. A partir de estos resultados, se puede indicar un valor medio representativo de q_1 de unos 20 MPa, aunque se detectó una primera zona hasta los 30 cm, con un valor de 14 MPa que aumentó a 26 MPa, para profundidades de 35-40 cm.
- Por último, en la Figura 6d, se muestra el penetrograma de uno de los seis ensayos Panda llevados a cabo en la LAV Madrid-Burgos, cerca de la localidad de Quintana del Puente (Caso N, Tabla 1). Los resultados obtenidos, muy semejantes a los anteriores, permiten

establecer un valor medio de q_1 de unos 21 MPa, con variaciones entre 17 MPa, en un primer tramo, y 26 MPa, a partir de los 30-40 cm de profundidad. Estos valores se obtuvieron en una LAV recién puesta en servicio y, por lo tanto, sin apenas degradación acumulada, por lo que se pueden considerar de referencia para banquetas de balasto recién construidas.

A modo de resumen y basado en el análisis conjunto de todos los resultados obtenidos en las LAVs, se puede establecer una relación entre un penetrograma tipo y la sección transversal de dichas LAVs, tal como se recoge en la Figura 7. Se aprecia que se puede asociar la profundidad crítica con la profundidad de la base de la traviesa y las zonas de mayor penetración por punta con posibles capas contaminadas de balasto. Además, con esta figura se pretende señalar que el ensayo no comienza en la superficie de la capa de balasto si no generalmente a unos 5 cm de profundidad donde la punta cónica, de 2 cm² y por tanto de tamaño inferior a una partícula de balasto, se acomoda a través de los huecos que dejan las partículas. Esta profundidad es denominada profundidad pre-sondeo y se incorpora como dato de entrada durante la ejecución del ensayo con el fin de llevar a cabo una adecuada correlación posterior entre sondeos.

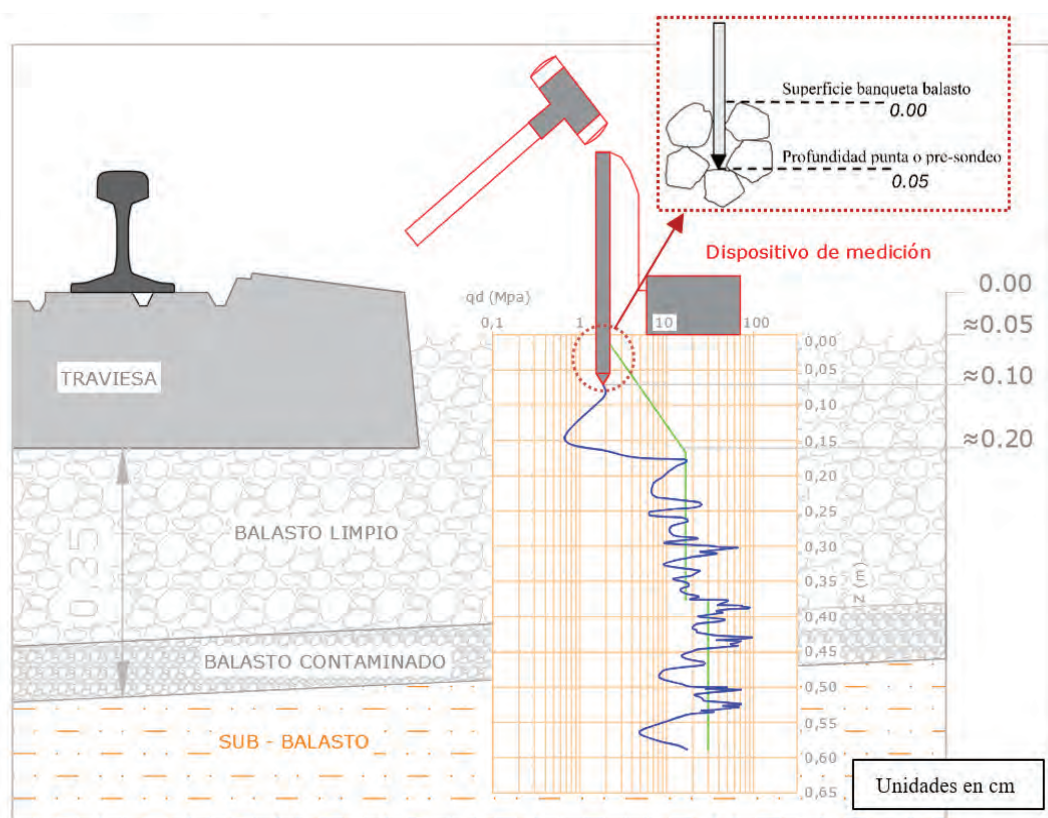


Fig. 7 – Correspondencia entre un penetrograma tipo del ensayo Panda y las capas y elementos de la infraestructura ferroviaria de una LAV.

De forma complementaria, en la Tabla 2, se han reunido las referencias bibliográficas encontradas sobre ensayos Panda en balasto llevados a cabo en vías ferroviarias francesas, donde el uso del ensayo Panda es muy habitual.

Tabla 2 – Resultados de campañas de ensayos Panda en balasto en vías reales según diferentes autores.

Referencia	Localización	Resistencia dinámica por punta (MPa)		Estado del balasto	Ubicación en vía	Observaciones
Escobar et al. (2014)	Francia	$q_{d,medio}$	15	Limpio	En el eje de vía y a ambos lados del carril	31 ensayos
		$q_{d,medio}$	38	Contaminado		
Lamas-López et al. (2016)	Francia	$q_{d,medio}$	26	45 cm balasto limpio, unos 9 cm balasto contaminado con finos de 2mm	En el eje de vía, a ambos lados del carril y en el hombro	Velocidad servicio: 200-220 km/h; <10 años en uso, vía convencional
Saussine et al. (2017)	Francia	$q_{d,50\%datos}$	12-32	Limpio	En el eje de vía y bajo el carril	19000 ensayos
		$q_{d,medio}$	20			
		$q_{d,50\%datos}$	16-42	Contaminado	En el eje de vía	
		$q_{d,medio}$	26			
		$q_{d,50\%datos}$	24-51	Contaminado	Bajo el carril	
		$q_{d,medio}$	35			
LG-CEDEX	España	q_1	14-25	Limpio	A ambos lados del carril	22 ensayos LAV's españolas
		q_1	26-43	Contaminado		

Notas:

La resistencia dinámica por punta se expresa en términos de q_d cuando se refiere a los datos procedentes de Escobar et al. (2014), Lamas-López et al (2016) y Saussine et al. (2017) ya que así aparece en dichas referencias, y en términos de q_1 , cuando se trata de valores obtenidos en este estudio.

El artículo de Saussine et al. 2017 se ha considerado, en este trabajo, una referencia clave por estar basado en un estudio estadístico con 19.000 ensayos Panda. Debido a la elevada variabilidad de los valores de resistencia por punta en el balasto resulta aún más adecuado que en cualquier otro material extraer conclusiones a través de un gran número de ensayos. Además, Saussine et al. 2017 tienen en cuenta la localización del ensayo (en el eje de vía o bajo el carril) y el estado del balasto (limpio o contaminado), como se puede apreciar en la Tabla 2. Obtienen resultados de resistencia notablemente superiores, del orden de 35 MPa, en el caso del balasto contaminado bajo el carril, frente a los 26 MPa, en el caso del balasto contaminado en el eje de vía. Este resultado es esperable debido a que la banqueta de balasto situada en la zona inmediatamente inferior al carril recibe mayor carga debida al paso de los trenes, lo que genera una mayor contaminación por degradación de las partículas de balasto, que la zona en el eje de vía.

Como se aprecia en la Tabla 2, los resultados obtenidos en este estudio están en concordancia con las referencias encontradas sobre ensayos Panda en balasto llevados a cabo en vías francesas por otros autores:

- **Balasto limpio:** según los ensayos realizados por el LG-CEDEX en vías reales, se puede establecer un valor de q_1 de la banqueta de balasto limpio, entre 14 y 25 MPa. Estos valores se encuentran en el rango de los indicados por Saussine et al. 2017 de 12-32 MPa y muy próximos al publicado por Lamas-López et al (2016) de 26 MPa. Por tanto, parece adecuado establecer, como valor recomendado de q_1 en la banqueta de balasto limpio en vías reales de buena calidad, un rango entre 20 y 25 MPa, siendo válidos también los valores de entre 15 y 30 MPa.

- **Balasto contaminado:** El rango de valores de q_1 de la banqueta de balasto contaminado estimado en este estudio, es de 26 a 43 MPa. Estos valores cubren el rango indicado en las demás referencias (26-38 MPa). De este modo, parece certero concluir que el valor de q_1 para un balasto contaminado está en el entorno de los 30 MPa en adelante.

El término de contaminación se refiere al relleno de los huecos del balasto por materiales más finos que éste, generados principalmente por su propia degradación. Cuando además interfieren el agua, arrastrando los finos al fondo de la banqueta, y otros materiales, que puede ascender desde la capa sobre la que se apoya la banqueta de balasto, se suele formar un nivel de gran competencia en la parte inferior de la banqueta. Un balasto parcialmente contaminado, por el relleno de parte de sus huecos por finos, proporciona valores de resistencia dinámica por punta mayores de los que se obtendrían en un balasto limpio o no contaminado, como se puede apreciar en la Tabla 2, siendo este hecho fácilmente identificable en los ensayos Panda.

3.3 – Ensayos en el Cajón Ferroviario del CEDEX (CFC)

En este apartado se lleva a cabo un análisis de los resultados de los ensayos Panda realizados en el CFC entre los años 2019 y 2021. En la Figura 8 se puede ver el resultado y la localización de los 36 ensayos efectuados durante las distintas campañas F- J, cuyos detalles se recogen en la Tabla 1.

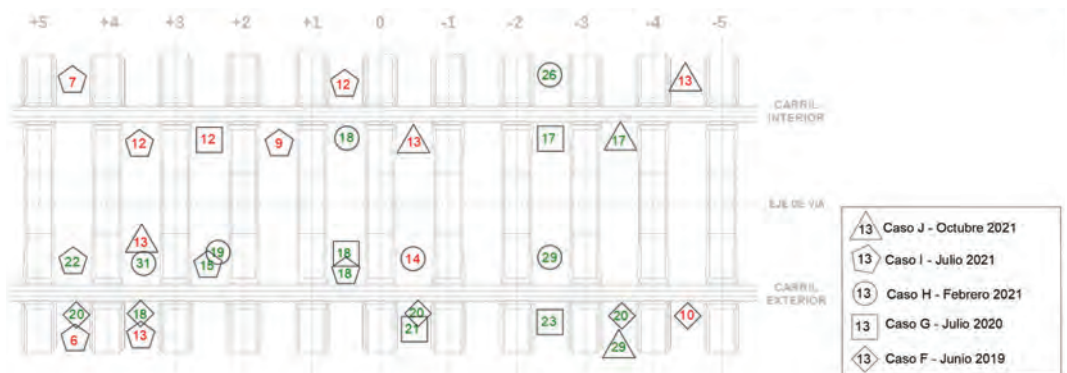


Fig. 8 – Resultados de resistencia representativa por punta (q_1) y ubicación de los ensayos Panda realizados en el Cajón Ferroviario del CEDEX.

El análisis de los resultados de las diferentes campañas y actuaciones llevadas a cabo en el CFC (Figura 8) permiten realizar los siguientes comentarios:

- Entre las campañas realizadas en junio de 2019 (Caso F) y en julio de 2020 (Caso G) no se realizaron operaciones de bateo o estabilización de la banqueta de balasto. Los resultados de los ensayos Panda de ambas campañas son muy similares, con resistencias q_1 de 17-18 MPa de media de todos los puntos ensayados, lo que demuestra la buena repetibilidad del ensayo.
- Los valores más bajos de resistencia se presentan en los extremos de la zona de ensayo, es decir, entre las traviesas -4/-5 (10 MPa) y +4/+5 (6 y 7 MPa), donde la bateadora no puede situarse. Esto impide el bateo del área comprendida entre dichas traviesas y una mejora en la compactación de la banqueta de balasto, afectando, por tanto, a su resistencia.
- Tal y como se ha indicado en el capítulo 3.3 (Ensayos en vías ferroviarias reales) y en base a los resultados obtenidos en este estudio y en otras referencias (Tabla 2), parece adecuado establecer, como valor recomendado de q_1 en la banqueta de balasto limpio en vías reales

de buena calidad, un rango entre 20 y 25 MPa, siendo válidos también los valores de entre 15 y 30 MPa. En julio de 2021, durante la ejecución de ensayos dinámicos, se detectaron desplazamientos verticales elevados en la vía lo que llevó a pensar en una pérdida de compacidad de la banqueta de balasto. Como se puede ver en la Figura 9, casi todos los ensayos anteriores a julio de 2021 (Casos F-G-H), dieron un resultado superior a 15 MPa, mientras que, a partir de julio de 2021 (Casos I-J), todos los ensayos excepto tres, dieron un resultado inferior a 15 MPa. Además, el valor medio de todos los ensayos realizados antes de julio de 2021 es igual a 20 MPa, mientras que el valor medio de todos los ensayos realizados después de julio de 2021 es igual a 13 MPa. Es decir, se aprecia una pérdida de resistencia, que podría estar asociada a la pérdida de compacidad de la banqueta de balasto, anteriormente indicada.

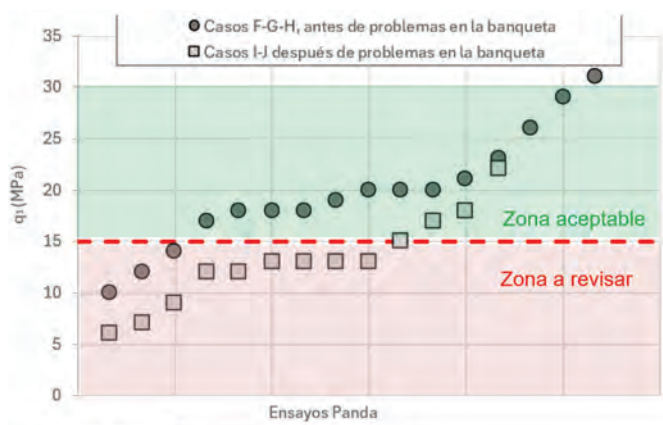


Fig. 9 – Resultados de resistencia representativa por punta (q_1) y ubicación de los ensayos Panda realizados en el Cajón Ferroviario del CEDEX.

En base a los resultados de los ensayos Panda realizados en el CFC entre 2019 y 2021, se puede establecer que la banqueta de balasto en el CFC presenta una resistencia q_1 del orden de 17 MPa de media, teniendo en cuenta los 30 ensayos efectuados. Este valor se encuentra algo por debajo de los valores obtenidos en vías reales (en el entorno de 20-25 MPa) y es acorde con la idea que se tiene de que la banqueta de balasto en el CFC posiblemente se compacte con menos energía que la que se utiliza en vías reales, como se ha mencionado anteriormente.

Por otra parte, la campaña de ensayos Panda sobre balasto contaminado con arena (Caso E, Tabla 1) no se ha incluido en la Figura 8, por no representar un balasto limpio, como el resto de los casos analizados en este trabajo. Sin embargo, resulta interesante destacar los resultados obtenidos con diferentes porcentajes de contaminación, para su uso en estudios en LAVs que atravesen zonas desérticas en los cuales esta situación pueda producirse. En los ensayos con balasto contaminado con arena al 50% y al 100% se obtuvieron, respectivamente, valores de q_1 de 31 y de 37 MPa. Un 100 % de contaminación con arena de un balasto supone un aumento en el valor de la resistencia ($q_1=37$ MPa) de casi el doble respecto a su valor sin contaminación (suponiendo un valor medio de referencia de 20 MPa).

3.4 – Resumen de resultados

La Tabla 3 presenta un resumen de los resultados de resistencia dinámica representativa por punta (q_1) obtenidos en los 73 ensayos realizados en balasto en diferentes localizaciones y estados de compacidad. Además, se incluyen los pesos específicos (γ_d) correspondientes a esos valores de q_1 , calculados mediante la Ecuación (1).

Tabla 3 – Resultados medios de q_1 de los ensayos Panda, en laboratorio, en vías reales y en el CFC.

Localización	Caso - Denominación	N	q_1 (MPa)	γ_d (kN/m ³)	Observaciones
Laboratorio	A – Molde cilíndrico	3	8	14,5	Vertido (para obtención de γ_d mínima)
		2	13	15,2	Compactado en capas de 5 cm de espesor (para obtención de γ_d máxima)
		1	21	16,5	Compactado en capas de 20 cm de espesor (para obtención de γ_d intermedia)
	B – Molde paralelepípedo	6	9	14,9	Vertido (para obtención de γ_d mínima)
		3	19	16,2	Compactado en capas de 5 cm de espesor (para obtención de γ_d máxima)
Vía real (LAVs, España)	C – Alhama de Aragón	4	25	16,3 ^a (15,8-16,8) ^b	Sección LAV. Balasto recrecido
	D – Brihuega 2021	4	23	16,2 ^a (15,7-16,7) ^b	Sección LAV.
	M- Brihuega 2022	8	20	16,0 ^a (15,5-16,5) ^b	Sección LAV.
	N- Quintana	6	21	16,0 ^a (15,5-16,5) ^b	Sección LAV. Recién puesta en servicio.
Cajón Ferroviario del CEDEX (CFC)	F - junio 2019	5	18	15,8 ^a (15,4-16,3) ^b	Sección LAV. Tras primer bateo
	G - julio 2020	5	18	15,8 ^a (15,4-16,3) ^b	Sección LAV. Sin actuaciones en el balasto
	H - febrero 2021	6	23	16,2 ^a (15,7-16,7) ^b	Sección LAV. Estabilización (500000 Tn)
	I - julio 2021	9	13	15,4 ^a (15,0-15,9) ^b	Sección LAV. Ensayos dinámicos (1560000 Tn)
	J - octubre 2021	5	17	15,8 ^a (15,3-16,3) ^b	Sección LAV. Ensayos dinámicos (1560000 Tn)

Notas:

^axx.x: valor central obtenido de la ecuación de ajuste principal (Ecuación 1 y Figura 5a.)

^b(yy.y-zz.z): intervalo de valores obtenido del rango de la ecuación de correlación [$\pm 0,5$] (Figura 5a)

N, número de ensayos

3.5 – Propuesta de valores admisibles de resistencia dinámica por punta

Después de evaluar el conjunto de los resultados obtenidos en los ensayos Panda realizados (Tabla 3) y de las diferentes referencias recopiladas (Tabla 2), la Tabla 4 y la Figura 10 presentan, como síntesis, una propuesta de valores admisibles de resistencia dinámica por punta (en términos de q_1) y su relación con el peso específico (γ_d) de una banqueta de balasto limpio. Cabe destacar que la extrapolación de estos resultados y conclusiones, a vías distintas de una LAV y a balasto contaminado en vez de limpio, debe hacerse con precaución y evaluando las características específicas de cada caso.

Tabla 4 – Propuesta de valores admisibles de q1 para una banqueta de balasto limpio, en función de los resultados del ensayo Panda.

q ₁ (MPa)	γ _d (kN/m ³)	Estado de compacidad	Validez	Observaciones
< 10	< 15,1	Muy bajo	No	Balasto limpio vertido
10-15	15,1-15,6	Bajo	(1)	Balasto limpio ligeramente compactado
15-20	15,6-16,0	Medio	Sí	Balasto limpio, bateado y estabilizado con paso de trenes
20-25	16,0-16,3	Medio – alto	Sí	Valores recomendados para balasto limpio, bateado y estabilizado con estabilizadora
25-30	16,3-16,5	Alto	Sí	Valores superiores para balasto limpio, bateado y estabilizado con estabilizadora
> 30	> 16,5	Muy alto	(1)	Balasto muy compactado o con comienzo de contaminación

Nota (1): su validez debe evaluarse en cada caso, en función especialmente del tipo de vía (distinta de una LAV) y de balasto (contaminado en vez de limpio) en estudio.

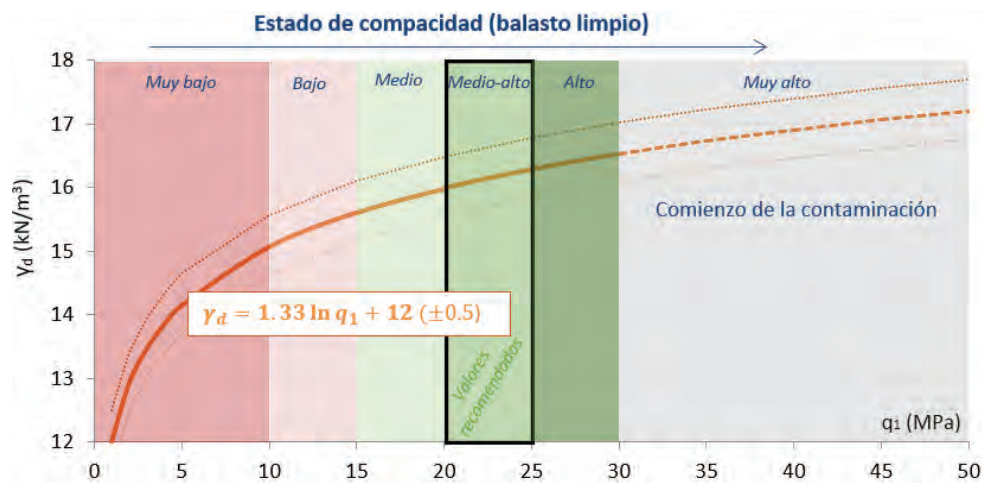


Fig. 10 – Propuesta de valores admisibles de q1 para una banqueta de balasto limpio, en función de los resultados del ensayo Panda.

- El análisis de la tabla y figura anteriores permite realizar los siguientes comentarios:
- Los pesos específicos se han calculado mediante la curva de correlación obtenida en los ensayos de laboratorio realizados para este trabajo [mostrada en la Ecuación (2)], válida para balastos de alta calidad como el empleado en este estudio y en las líneas de alta velocidad.
 - El valor inferior límite aceptable de q1 se podría establecer en el entorno de 15 MPa. Este valor se asocia a un peso específico (γ_d) de 15,5 kN/m³ con un rango de variación entre 15,2 y 16,1 kN/m³, asegurando un estado de compacidad adecuado mínimo de la banqueta de balasto.
 - El valor superior límite aceptable de q1 se podría establecer en 30 MPa, asociado a pesos específicos (γ_d) superiores a 16,5 kN/m³.

- Se considera que valores de q_1 superiores a 30 MPa podrían indicar el comienzo de la zona de balasto contaminado dentro de la banqueta de balasto. Este valor se corrobora con los ensayos realizados con una contaminación con arena del 50 % y del 100 %, en los que se obtuvieron valores de q_1 superiores a 30 MPa.
- Los límites de q_1 considerados como válidos se encuentran entre ambos límites: 15 y 30 MPa. Dentro de dicho rango, se puede considerar un estado de compacidad medio para valores de q_1 entre 15 y 20 MPa, y un estado de compacidad de medio a alto, para valores de q_1 entre 20 y 30 MPa.
- Por último, los valores de q_1 que se consideran recomendable para un balasto limpio deberían estar entre 20 y 25 MPa, asociados a γ_d de entre 16,0 y 16,3 kN/m³. Este rango de valores se encuentra comprendido entre los valores obtenidos en vías reales por el LG-CEDEX y por otros autores.

4 – CONCLUSIONES

Las principales conclusiones del artículo se resumen en los siguientes puntos clave:

- La resistencia que se obtiene mediante el ensayo Panda es claramente dependiente del peso específico del balasto. La resistencia dinámica por punta de un balasto muy compactado en capas de poco espesor puede llegar a ser del doble de la resistencia de un balasto directamente vertido.
- La curva de calibración $\gamma_d - q_d$ obtenida en este trabajo es prácticamente coincidente con la curva propuesta por Benz-Navarrete (2009) para un balasto de origen basáltico, lo que permite pensar en una cierta validez general para balastos limpios de alta calidad. La ecuación de calibración obtenida es la indicada en la Ecuación 1.
- Los valores de resistencia dinámica por punta obtenidos con el Panda en banquetas de balasto limpio en vías reales suelen superar los 20 MPa. Este valor implicaría, según la ecuación de calibración, que el peso específico del balasto en vía es del orden de 16,0 kN/m³ o superior, cuando se encuentra en buenas condiciones de compacidad (por ejemplo, tras las tareas de bateo y estabilización).
- Los valores límites de q_1 considerados como válidos, para banquetas de balasto, son 15 y 30 MPa, correspondientes a pesos específicos usuales en vías ferroviarias de entre 15,5 y 16,5 kN/m³.
- Los valores de q_1 que se consideran recomendables para un balasto limpio deberían estar entre 20 y 25 MPa, asociados a γ_d de entre 16,0 y 16,3 kN/m³.

5 – AGRADECIMIENTOS

A todas las personas del LG del CEDEX que han colaborado en la realización de los ensayos: José Luis Fdez.-Rocha, Felipe García, Eva Marull, Fernando Pesquera, Mauro Muñoz, Rubén Ruíz, Miguel Martínez, Marcos Asperilla, Fermín Llamas y, María Santana.

6 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benz-Navarrete M. A. (2009). *Mesures dynamiques lors du battage du pénétromètre Panda 2*. PhD thesis. Blaise Pascal University, Clermont Ferrand, France.
- Benz-Navarrete, M. A.; Breul, P.; Arancibia, G.; Moustan, P. (2019). *Correlation between static (CPT) and dynamic variable energy (Panda) cone penetration tests*. Proceedings of the 6th Int. Conf. Geot. & Geophysical Site Characteriz, pp. 1-11. <https://doi.org/10.53243/ISC2020-421>

- Breul, P.; Saussine, G. (2011). *On-site mechanical characterization of the ballast state*. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 55(1), pp. 31–38. <https://doi.org/10.3311/pp.ci.2011-1.04>
- Chaigneau, L. (2001). *Caractérisation des sols de surface a l'aide d'un pénétromètre*. PhD thesis. Blaise Pascal University, Clermont Ferrand, France.
- Escobar E.; Benz M. A.; Haddani, Y.; Lamas-López, F.; Calon, N.; Costa D'Aguiar, S. (2014). *Dynamic railway sites characterization using a Panda 3® Penetrometer*. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014 – Beauvais 8-10 juillet 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.099>
- Etaire, J.; Cuéllar, V.; Pardo de Santayana, F.; Santana, M. 2017. *Testing railway tracks at 1:1 scale at CEDEX Track Box*. International Congress on High-Speed Rail. Technologies and Long-Term Impacts. Ciudad Real, Spain.
- Gourvès, R. (1991). *Le PANDA – pénétromètre dynamique léger à énergie variable*. LERMES CUST, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand.
- Haddani, Y.; Breul, P.; Saussine, G.; Benz-Navarrete, M.A.; Ranvier, F.; Gourvès, R. (2016). *Trackbed mechanical and physical characterization using panda®/geoendoscopy coupling*. Procedia Eng., Vol 143, pp 1201-1209.
- Haddani, Y. (2020). Manuscrito no publicado. El Panda: Síntesis de correlación.
- Lamas-Lopez, F.; Cui, Y. J.; Costa dAguiar, S.; Calon, N. (2016). *Geotechnical auscultation of a French conventional railway track-bed for maintenance purposes*. Soils and Foundations, 56(2), pp. 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.02.007>
- NF P 94-105 (2012). *Suelos: Reconocimiento y pruebas. Control de calidad de compactación. Método del penetrómetro dinámico de energía variable: Principio y método de calibrado del penetrómetro*.
- Sanglerat, G. (1972). *The Penetrometer and Soil Exploration. Desarrollos en Ingeniería Geotécnica 1*. Elsevier Publishing: Nueva York.
- Saussine, G.; Dhemaied, A.; Delforge, Q.; Benfeddoul S. (2017). *Statistical analysis of cone penetration resistance of railway ballast*. EPJ Web of Conferences 140, 16011 (2017). Powders & Grains 2017. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714016011>
- Zhou, S. (1997). *Caracterisation des sols de surface a l'aide du penetrometer dynamic léger a energie variable type Panda*. Formation Doctorale “Materiaux, structures, fiabilité en génie civil et génie mécanique” Laboratoire d'Accueil, LERMES/CUST, Université Blaise Pascal.



The Ground is our Challenge

PRINCIPAIS ÁREAS DE ATIVIDADE

Projeto, Fiscalização e Formação

- Escavações e Contenções Periféricas
- Fundações Especiais
- Tratamento de Terrenos
- Reforço e Recalçamento de Fundações
- Contenção de Fachadas
- Túneis e Obras Subterrâneas
- Estabilidade de Taludes
- Estudos Geológicos e Geotécnicos
- Demolições

www.jetsj.com



Praças de Pedágio, P2 e P3
Santa Catarina, Brasil



Poço de minério
Kamsar, Guiné



Biblioteca Central
e Arquivo Municipal
Lisboa, Portugal



Edifício Solar Santana
Lisboa, Portugal

Sede

Rua Julieta Ferrão, 12 - Escritório 1501

1600-131 LISBOA, Portugal

Tel.: [+351] 210 505 150 / 51

Email: info@jetsj.com

www.linkedin.com/company/jetsj-geotecnia-lda/

MACCAFERRI

PoliMac®: preparado para os desafios das mudanças climáticas

As mudanças climáticas têm intensificado eventos extremos, exigindo soluções robustas e inovadoras em infraestrutura. O **PoliMac®** surge como uma resposta eficiente a esses desafios, oferecendo alta resistência à abrasão, agentes químicos e radiação UV — características essenciais para obras de contenção e proteção em condições severas.

PoliMac®: alta tecnologia, durabilidade e compromisso com um futuro sustentável.



Para saber mais,
acesse o QR Code.

Nova tecnologia Polimérica

MACCAFERRI POLIMAC

Revestimento **PoliMac®**
(com identificação personalizada)

- 1 Revestimento metálico de longa vida útil GalMac® 4R
- 2 Revestimento intermetálico
- 3 Alma de aço BTC*
*Baixo teor de Carbono

Conheça o software GAWAC® 3.0!

Desenvolvido para apoiar engenheiros e projetistas de forma rápida e confiável na realização de análises de estabilidade em muros de contenção em gabiões.

Visite **nosso site** para conhecer o novo critério de análise para os gabiões e faça o **download do GAWAC® 3.0**.

Visite nosso site e saiba mais: www.maccaferri.com/br





COBA



GEOLOGIA E GEOTECNIA

Hidrogeologia • Geologia de Engenharia • Mecânica das Rochas • Mecânica de Solos
Fundações e Estruturas de Suporte • Obras Subterrâneas • Obras de Aterro
Estabilidade de Taludes • Geotecnia Ambiental • Cartografia Geotécnica



- Planeamento de Recursos Hídricos
- Aproveitamentos Hidráulicos
- Produção e Transporte de Energia Eléctrica
- Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas Residuais e Pluviais
- Agricultura e Desenvolvimento Rural
- Infra-estruturas Rodoviárias, Ferroviárias e Aeroportuárias
- Ambiente
- Estruturas Geotécnicas
- Cartografia e Cadastro
- Controle de Segurança e Reabilitação de Obras
- Gestão e Fiscalização de Empreendimentos



PORTUGAL
REGIÃO CENTRO E SUL
Av. 5 de Outubro, 323
1649-011 LISBOA
Tel.: (351) 210 125 000, (351) 217 925 000
Fax: (351) 217 970 348
E-mail: coba@coba.pt
www.coba.pt

Av. Marquês de Tamar, 9, 6.
1050-152 LISBOA
Tel.: (351) 217 925 000
Fax: (351) 213 537 492

REGIÃO NORTE
Rua Mouzinho de Albuquerque, 744, 1.
4450-203 MATOSINHOS
Tel.: (351) 229 380 421
Fax: (351) 229 373 648
E-mail: engico@engico.pt

ANGOLA
Praça Farinha Leitão, edifício nº 27, 27-A - 2.º Dio
Bairro do Maculuso, LUANDA
Tel./Fax: (244) 222 338 513
E-mail: geral.coba-angola@netcoba.co.ao

MOÇAMBIQUE
Centro de Escritórios. Pestana Ravuma Hotel.
Rua da Sé nº114, 4.º Andar - 401 A, MAPUTO
Tel.: (258) 21 328 813
Fax: (258) 21 016 165
Tlm: (258) 820 047 454
E-mail: coba.mz@gmail.com

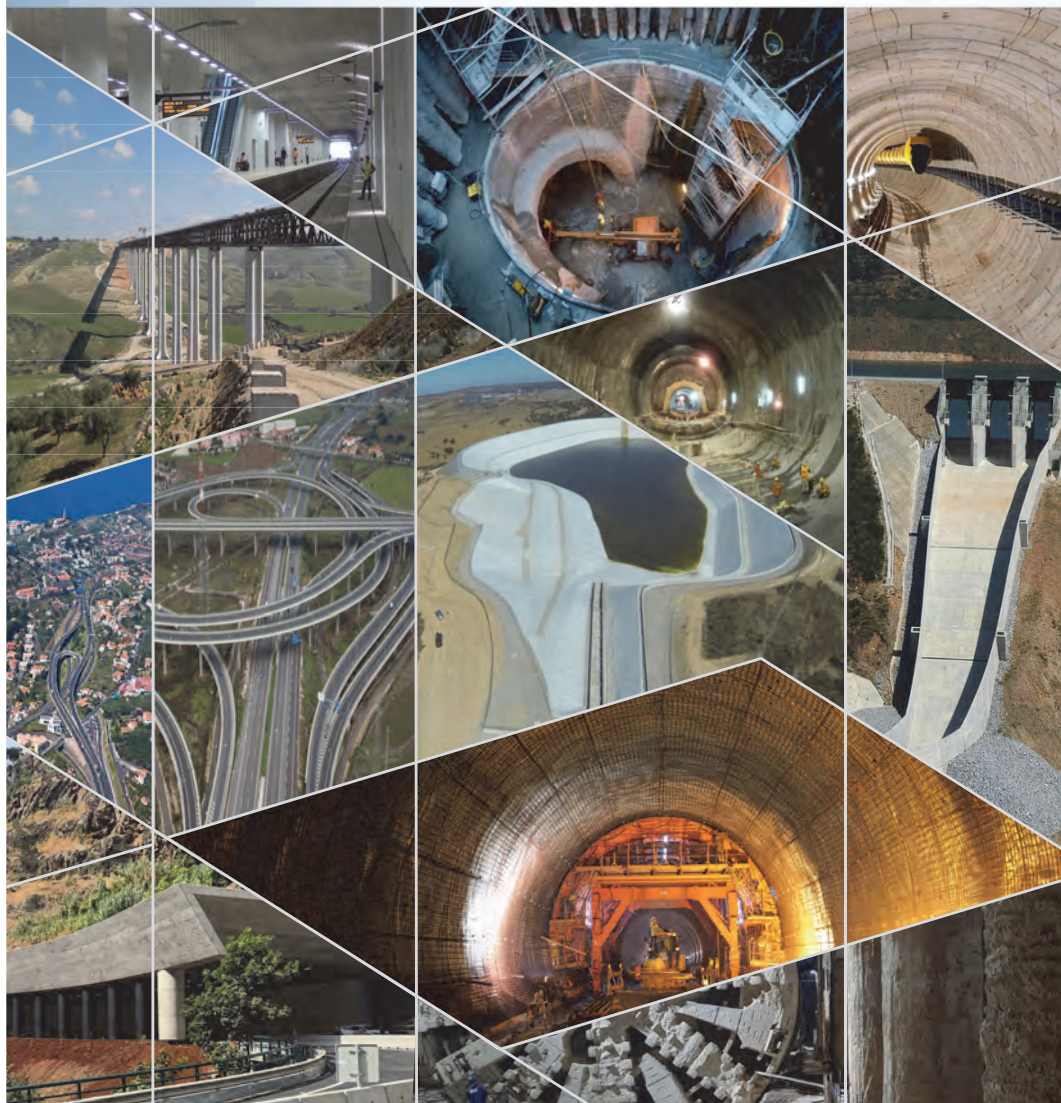
ARGÉLIA
09, Rue des Frères Hocine
El Biar - 16606, ARGEL
Tel.: (213) 21 922 802
Fax: (213) 21 922 802
E-mail: coba.alger@coba.pt

BRASIL
Rio de Janeiro
Rua Buenos Aires 68, 25.
Centro, Rio de Janeiro, RJ - CEP 20.070-022
Tel.: (55 21) 3553 67 30
Tel.: (55 21) 8366 00 06
geral@coba.com.br

Fortaleza
Av. Senador Virgílio Távora 1701, Sala 403
Aldeota - Fortaleza CEP 60170 - 251
Tel.: (55 85) 3244 32 85
Fax: (55 85) 3244 32 85
E-mail: coba1@eisenhower.com.br

EMIRATOS ÁRABES UNIDOS
LLJ Business Center, Al Jazeera Stadium
PO Box 38360, Abu Dhabi - U.A.E.
Tel.: (971) 2 495 0675
Fax: (971) 2 4454672

BUILDING THE WORLD, BETTER



Consultoria em Engenharia e Arquitetura

Geologia, Geotecnia, Fiscalização de Obras Geotécnicas

Barragens de Aterro, Obras Subterrâneas, Estruturas de Suporte

Fundações Especiais, Tratamento de Terrenos, Geomateriais



TPF - CONSULTORES DE ENGENHARIA E ARQUITETURA, S.A.
www.tpf.pt

Uma referência Incontornável no Setor

An Unavoidable Reference in the Sector



+11000
PROJETOS COMPLETADOS
Completed projects



+1.000.000
METROS PERFURADOS
Drilled meters



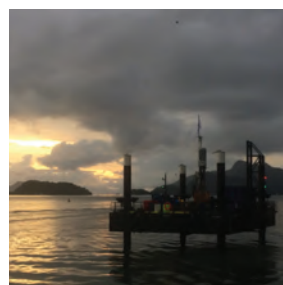
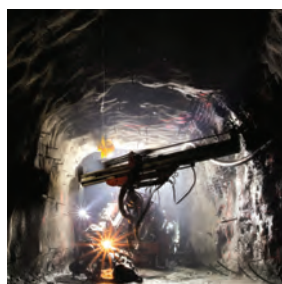
+3.000
CLIENTES
Clients



+50
ANOS DE EXPERIÊNCIA
Years of experience

Com mais de **cinco décadas** no mercado e atuação em 3 países

With over **five decades** in the market and operations in 3 countries



Áreas de atuação

Areas of activity

Sondagens geotécnicas (Onshore e Offshore)
Geotechnical surveys

Sondagem para Pesquisa Mineral
Drilling for Mineral Research

Laboratório de Ensaios Geotécnicos (mecânica de solos, rochas e agregados)
Geotechnical Testing Laboratory
(soil, rock and aggregate mechanics)

Obra Geotécnica
Geotechnical Work

Controle Tecnológico, Monitoramento e Instrumentação Geotécnica
Technological Control, Monitoring and Geotechnical Instrumentation

Prospecção geofísica
Geophysical prospecting

Consultoria e Projeto Geotécnico
Geotechnical Consulting and Design

Inovação e Desenvolvimento Plataforma Geo+
Innovation and Development Geo+ Platform

 **geocontrole**
Soluções em Geotecnia e Geologia
www.geocontrole.com



Portugal
Brasil
Moçambique



PIONEERING AND INNOVATION

SINCE 1921

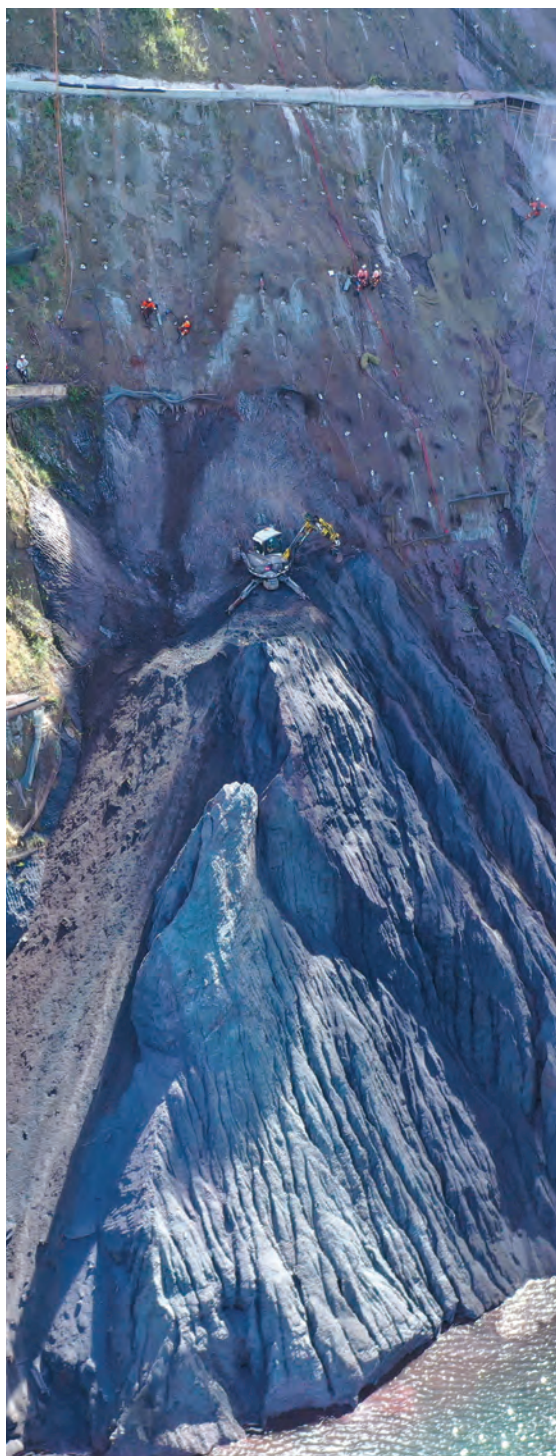
 **TEIXEIRA DUARTE**
ENGENHARIA E CONSTRUÇÕES, S.A.

RETAINING WALL, 400MM DWALL
SAN PAULO - BRAZIL



Building a better world.
teixeiraduarteconstruction.com

LICENCE NO. 24 - RIB



For 25 years, enabling complex projects in hard-access locations

Height-engineering:
this is the basis of
Civil Master's operations.

With a multidisciplinary
and committed team, we
develop the best solution
for each client's challenges,
taking care of people and
the environment.

civilmaster.com.br

REOLOGIA: O Futuro da Mineração

Além do Laboratório, Reologia no Centro das Decisões de Engenharia

Na mineração contemporânea, o futuro está sendo construído com base na inteligência técnica e no domínio do comportamento dos materiais. Nesse cenário, a reologia, ciência que estuda o fluxo e a deformação de materiais, ganha protagonismo, especialmente no tratamento e descarte de rejeitos. A Fonntes Geotécnica tem incorporado a reologia como ferramenta central em seus projetos, indo além do uso laboratorial e aplicando-a diretamente na tomada de decisões. Ao compreender as particularidades do comportamento dos rejeitos, é possível propor intervenções mais precisas, seguras e sustentáveis. Esse diferencial só é possível graças à estrutura verticalizada da Fonntes, que permite uma atuação integrada desde a investigação geotécnica até a modelagem computacional, monitoramento e execução das obras. Isso garante agilidade nos processos, além de maior confiabilidade técnica na avaliação de riscos e na estabilidade das estruturas.

Case de Sucesso: Estabilização e Descaracterização da Barragem B2A

O domínio técnico da Fonntes Geotécnica sobre reologia e comportamento de materiais se concretiza em projetos robustos e reconhecidos no setor. Um dos exemplos mais emblemáticos é sua atuação no Complexo Fernandinho, onde, desde 2017, a empresa conduz os estudos e intervenções voltadas à estabilização e descaracterização da Barragem B2A.

A estrutura apresentava fatores de segurança abaixo do exigido pela legislação. Para reverter esse quadro, a Fonntes desenvolveu uma solução integrada baseada no rebaixamento do nível freático, com escavações controladas a montante e instalação de poços tubulares profundos para bombeamento contínuo.

A Fonntes foi responsável por toda a cadeia de estudos: análises tensão-deformação, modelagem hidráulica do Canal de Cintura, adequação dos taludes e definição de parâmetros críticos, sempre com base em extensas investigações geotécnicas e referências técnicas atualizadas.

O projeto também incluiu o Acompanhamento Técnico de Obras (ATO), com monitoramento contínuo por piezômetros, marcos superficiais, topografia e geofones, garantindo controle rígido das deformações e segurança operacional.

Como resultado, a estrutura obteve, no segundo semestre de 2024, a Declaração de Condição de Estabilidade (DCE) e iniciou o processo de descaracterização em seis etapas, todas baseadas nos critérios estabelecidos durante a fase de estabilização.

A atuação da Fonntes na Barragem B2A reafirma sua capacidade de transformar conhecimento técnico em soluções práticas e seguras, destacando-se como referência em engenharia geotécnica aplicada à mineração moderna.



PROJETOS E SERVIÇOS EM ENGENHARIA GEOTÉCNICA



Não importa
o tamanho do desafio,
cada solução é concebida
para ser nosso melhor projeto.

fgsgeotecnia.com





Safety is our nature

Líder mundial em pesquisa, desenvolvimento, fabricação e comercialização de soluções em aço de alta resistência contra os desastres naturais.

Leading research, development, manufacturing and supplying high tensile steel solutions against natural disasters.

SEGURANÇA É A NOSSA NATUREZA

Estabilização de taludes |

Slope stabilization

Queda de rochas |

Rockfall

Escorregamento superficial |

Shallow landslides

Corridas detríticas |

Debris flow

Erosões costeiras |

Coastal erosions

Escavações subterrâneas |

Underground support

Para mais informações, acesse

www.geobrugg.com



Rio de Janeiro/RJ – Brasil.



APRESENTAÇÃO DE ORIGINAIS

Os trabalhos a publicar na revista Geotecnia são classificados como “Artigos”, “Notas Técnicas” e “Discussões” de artigos anteriormente publicados na revista. Artigos que descrevam o estudo de casos de obra envolvendo trabalho original relevante na prática da engenharia civil são particularmente encorajados.

A decisão de publicar um trabalho na revista compete à Comissão Editorial, competindo-lhe também a respetiva classificação. Cada trabalho será analisado por pelo menos três revisores. Os pareceres dos revisores serão apresentados no prazo de um mês.

As Instruções para os Autores e o “Template” para formatação de originais podem ser obtidos de <https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia>.

A submissão dos trabalhos à revista Geotecnia é efetuada através da página eletrónica com o endereço <http://www.revistageotecnia.com/>. Através dessa plataforma, far-se-á a comunicação entre a direção da revista, corpo editorial e os autores para a revisão dos trabalhos. Outras informações e esclarecimentos adicionais podem ser pedidos a:

Direção da Revista Geotecnia
SPG, a/c LNEC
Av. Brasil, 101
1700-066 Lisboa
Portugal
E-mail: editor@revistageotecnia.com

PRESENTACIÓN DE ORIGINALES

Los trabajos para publicar en la revista Geotecnia se clasifican en “Artículos”, “Notas Técnicas” y “Discusiones” de artículos anteriormente publicados en la revista. Se recomiendan especialmente artículos que describan el estudio de casos de obra que incorporen trabajos originales relevantes en la práctica de la ingeniería civil.

La decisión de publicar un trabajo en la revista compete a la Comisión Editorial, correspondiéndole también la respectiva clasificación. Cada trabajo será analizado por al menos tres revisores. Los revisores presentarán sus pareceres sobre los artículos en el plazo de un mes.

Las Instrucciones para los Autores y el “Template” para formatear originales pueden ser obtenidos en <https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia>.

La remisión de los trabajos a la revista Geotecnia se efectúa a través de la página electrónica con la dirección <http://www.revistageotecnia.com/>. A través de esta plataforma se realizará la comunicación entre la dirección de la revista, el cuerpo editorial y los autores para la revisión de los trabajos. Informaciones y esclarecimientos adicionales pueden solicitarse a:

Dirección de la Revista Geotecnia
SPG, a/c LNEC
Av. Brasil, 101
1700-066 Lisboa
Portugal
E-mail: editor@revistageotecnia.com

- 3 Metodologia BIM e gémeos digitais em barragens de aterro: Conceitos e revisão da literatura**
BIM methodology and digital twins in embankment dams: Concepts and literature review
Alexandra Rosa, Miguel Azenha, Joana Carreto
- 35 Sellado adsorbente de base de vertedero para la gestión de PFAS: Desafíos y soluciones con geotextiles**
Adsorptive landfill base sealing for PFAS risk management: Challenges and geotextile solutions
Marco Rodriguez, Stefan Niewerth, James Feest, Gus Martins
- 53 Impacte do modo de corte cíclico no comportamento de amostras reconstituídas de rejeitados de volfrâmio**
Impact of cyclic shear mode on the behaviour of reconstituted tailings samples
João Pedro Oliveira, Luis Araújo Santos, Paulo Coelho
- 77 El papel de la geología estructural en los grandes deslizamientos de la autovía A7 en Granada**
The role of structural geology in the major landslides on the A7 motorway in Granada
Javier González-Gallego, Javier Moreno Robles, Alberto Fernandez, Jose Luis García de la Oliva, Carlos de las Heras
- 93 Drones como ferramenta complementar na segurança de barragens de aterro**
Drones as a complementary tool for embankment dam safety
Daniel Leite, João Marcelino, Nuno Guerra, João Manso
- 125 El ensayo de penetración dinámica de energía variable para estimar la calidad de la banqueta de balasto**
Variable energy dynamic penetration test to estimate quality of ballast bed
Natalia Montero-Cubillo, José Estaire