

EXTRA fevereiro
febrero
february
2024

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	CO-EDITORES / CO-EDITORS	
António Gomes Correia, UMinho, Portugal	Alberto Sayão, PUC-Rio, Brasil	Fernando Pardo de Santayana, CEDEX, España
EDITORES ASSOCIADOS / EDITORES ASOCIADOS / ASSOCIATE EDITORS		
Ana Cristina Sieira, UERJ, Brasil	César Sagaseta, U. Cantabria, España	José Estaire, CEDEX, España
Nuno Guerra, UNL, Portugal	Paulo Cesar Maia, UENF, Brasil	Paulo Pinto, FCTUC, 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 ininterrumpidamente. 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 (2023-24)

Antonio Gens Solé (U. P. Cataluña, Barcelona, España)	Katia Bicalho (UFES, Vitória, Brasil)
António Viana da Fonseca (FEUP, Porto, Portugal)	Leandro Alejano Monge (U. Vigo, España)
Claudio Olalla Marañón (U. P. Madrid, España)	Luis Leal Lemos (FCT, U. Coimbra, Portugal)
Daniel Dias (U. Grenoble, França)	Manuel Pastor Pérez (U. P. Madrid, España)
David Taborda (Imperial College, Londres, Reino Unido)	Márcio S. Almeida (COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil)
Diego Manzanal (U. P. Madrid, España)	Marcos Arroyo Álvarez de Toledo (U. P. Catalunya, Barcelona, España)
Eduardo Alonso Pérez de Ágreda (U. P. Cataluña, Barcelona, España)	Margarida Pinho-Lopes (U. Aveiro, Portugal)
Eduardo Fortunato (LNEC, Lisboa, Portugal)	Marina Bellaver Corte (PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil)
Emanuel Maranhã das Neves (IST, U. Lisboa, Portugal)	Michèle Casagrande (U. Brasília, Brasil)
Ennio Palmeira (U. Brasília, Brasil)	Nilo Consoli (UFRGS, Porto Alegre, Brasil)
Enrique Asanza Izquierdo (CEDEX, Madrid, España)	Nuno Cristelo (UTAD, Vila Real, Portugal)
Eurípedes Vargas (PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil)	Pablo Mira McWilliams (CEDEX, Madrid, España)
Fernando Danziger (COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil)	Paulo da Venda Oliveira (FCT, U. Coimbra, Portugal)
Fernando Marinho (U. São Paulo, Brasil)	Pedro Alves Costa (FEUP, Porto, Portugal)
Fernando Schnaid (UFRGS, Porto Alegre, Brasil)	Rafael Jiménez Rodríguez (U. P. Madrid, España)
Helder Chaminé (ISEP, Porto; Centro GeoBioTec, U. Aveiro, Portugal)	Ramón Verdugo Alvarado (U. Chile, Santiago de Chile, Chile)
Ignacio Pérez Rey (U. Vigo, España)	Renato Cunha (U. Brasília, Brasil)
Isabel Fernandes (FC, U. Lisboa, Portugal)	Ricardo Oliveira (COBA/LNEC/UNL, Lisboa, Portugal)
Joaquim Tinoco (U. Minho, Guimarães, Portugal)	Roberto Coutinho (UFP, Recife, Brasil)
Jorge Castro González (U. Cantabria, Santander, España)	Roberto Tomás Jover (U. Alicante, España)
Jorge Zornberg (U. Texas, Austin, EUA)	Rubén Ángel Galindo Aires (U. P. Madrid, España)
José Luis de Justo Alpañés (U. Sevilla, España)	Tácio M.P. Campos (PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil)
José Neves (IST, U. Lisboa, Portugal)	Tarcísio B. Celestino (U. São Paulo, São Carlos, Brasil)
José Vieira de Lemos (LNEC, Lisboa, Portugal)	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@lnece.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, Laboratorio de Geotecnia C/ Alfonso XII, 3 28014 Madrid, España Tel.: (+34) 91 335 7500 Fax: (+34) 91 335 7322 E-mail: info@semsig.org http://www.semsig.org
---	---	--

Número Extra

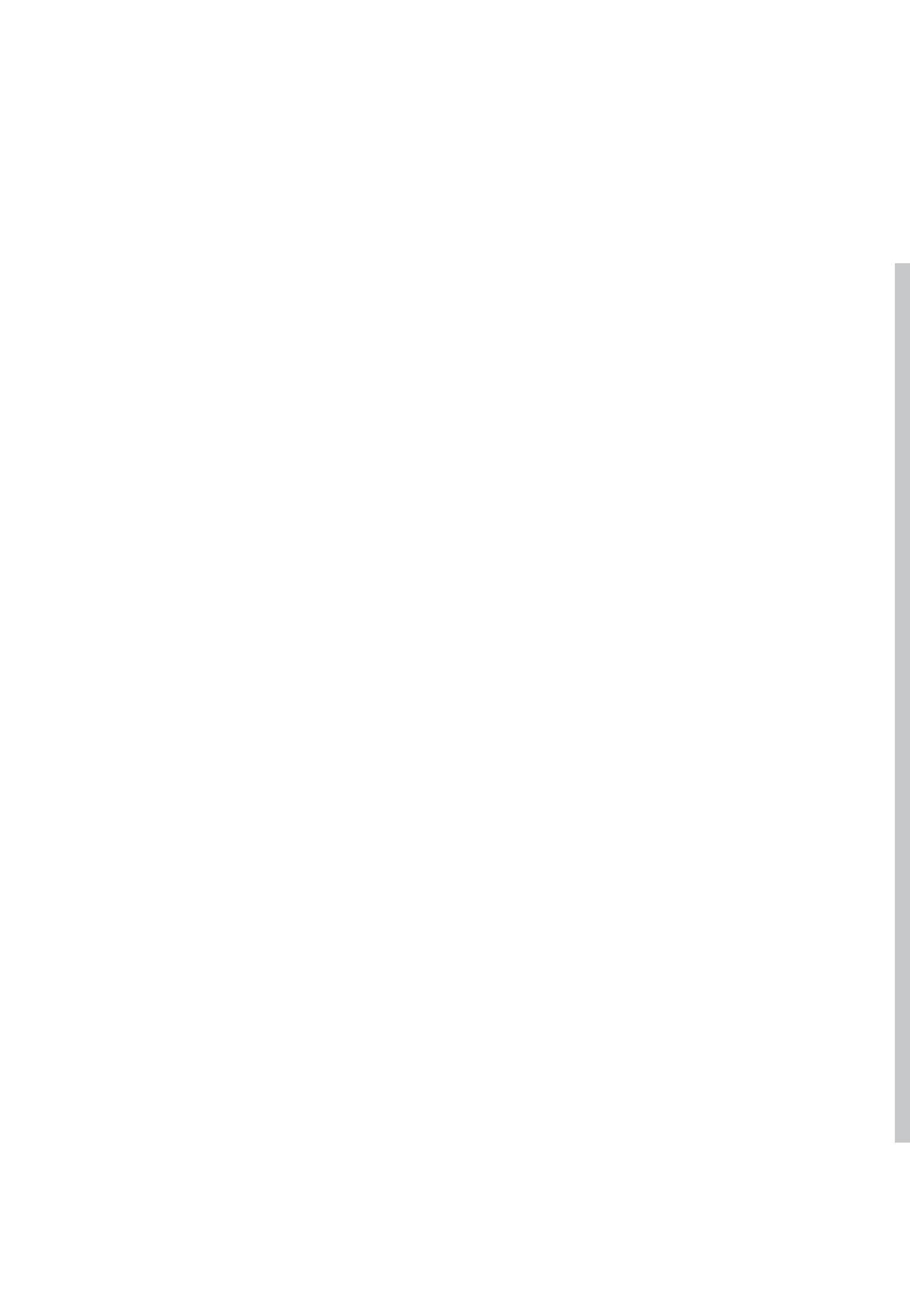
**50° Aniversário da Sociedade Portuguesa de Geotecnia
75° Aniversário do Laboratório Nacional de Engenharia Civil**

Número Extra

**50° Aniversario de la Sociedad Portuguesa de Geotecnia
75° Aniversario del Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil**

Extra Issue

*50th Anniversary of the Portuguese Geotechnical Society
75th Anniversary of the Nacional Laboratory for Civil Engineering*



ÍNDICE *CONTENTS*

EXTRA fevereiro
febrero
february
2024

- 3 **Editorial**
Alexandre Pinto
Laura Caldeira
- 9 **A durabilidade dos geossintéticos: estigma ou fator de sustentabilidade**
The durability of geosynthetics: stigma or sustainability factor
Maria da Graça Lopes
Madalena Barroso
- 21 **Albufeiras na Ilha da Madeira: (imprescindível) impermeabilização com geossintéticos**
Water reservoirs on Madeira Island: (essential) waterproofing with geosynthetic
Madalena Barroso
Laura Caldeira
Pedro França Ferreira
Paulo França
Carlos Maligno
- 41 **A Geotecnia na transição eco-digital das infraestruturas de transporte**
Geotechnics in the eco-digital transition of transport infrastructures
José Neves
João Moutinho
Ana Cristina Freire
André Paixão
Bernardo Monteiro
Manuel Parente
Nuno Cristelo
António Gomes Correia
- 79 **A conquista do espaço subterrâneo**
The conquest of underground space
Raúl Sarra Pistone
João Gouveia
Nadir Plasencia
José Nuno Figueiredo
Gonçalo Diniz Vieira
- 103 **Ensino e investigação da Geotecnia nas universidades em Portugal. Uma perspetiva sobre as últimas oito décadas**
Education and research in Geotechnics in Portuguese universities. A perspective over the last eight decades
Manuel Matos Fernandes
- 125 **O projeto cápsula do tempo e a história da Geotecnia em Portugal**
Heritage time capsule project and Portuguese geotechnics history
José Mateus de Brito

Editorial

Alexandre Pinto

Laura Caldeira

Editores convidados/Editores convidados/Guest Editors

O presente número extra da revista *Geotecnia*, evocativo do quinquagésimo aniversário da Sociedade Portuguesa de Geotecnia e do septuagésimo quinto aniversário do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, apresenta um conjunto de artigos de elevado interesse técnico e científico que abordam temas de grande abrangência, desde os geossintéticos à transição eco-digital das infraestruturas de transporte, incluindo o espaço subterrâneo, sendo complementados pelo ensino e investigação da geotecnia nas universidades portuguesas. O último artigo aborda o Projeto Cápsula do Tempo e, em particular, a história da geotecnia em Portugal.

No trabalho apresentado por **Lopes e Barroso** (Lopes e Barroso, 2024) é abordado um importante conceito associado à durabilidade dos geossintéticos, na perspetiva de estigma ou de fator de sustentabilidade. O artigo mostra que, paralelamente ao sucesso da utilização dos geossintéticos em inúmeras aplicações, a aplicação dos mesmos tem vindo a superar grandes desafios/estigmas de forma a permitir a sua imposição no mercado, muitos deles relacionados com a respetiva durabilidade. Assim, se numa primeira fase, terá sido necessário ultrapassar a problemática da durabilidade, tendo em consideração a vida útil das obras geotécnico-ambientais em que eram (e são) aplicados, atualmente questiona-se a sua perenidade excessiva, pondo em causa a sua sustentabilidade.

Barroso, Caldeira, Ferreira, França e Maligno (Barroso et al., 2024) apresentam o trabalho de aplicação de geossintéticos na impermeabilização de albufeiras na ilha da Madeira, destacando-se as albufeiras das barragens de Pico da Urze e da Portela. Estas infraestruturas têm em comum a particularidade de as características das formações geológicas vulcânicas ocorrentes e os materiais de construção das barragens não garantirem a retenção da água, tornando imprescindível o uso de geossintéticos na impermeabilização das suas albufeiras. A utilização destes materiais colocou alguns desafios ao nível da conceção e da construção dos seus sistemas de impermeabilização, sendo, no âmbito do acompanhamento dos trabalhos, destacado o papel importante do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

O trabalho apresentado por **Neves, Moutinho, Freire, Paixão, Monteiro, Parente, Cristelo e Correia** (Neves et al., 2024) aborda a temática da geotecnia na transição eco-digital das infraestruturas de transporte, com a compilação de exemplos nacionais de investigação, desenvolvimento e inovação relacionados com a transição verde e a transformação digital no âmbito da geotecnia nos transportes e associados às terraplenagens, pavimentos e vias-férreas. No âmbito da transição verde, são apresentados exemplos de aplicação de materiais não convencionais e renováveis, e de técnicas de estabilização baseadas na ativação alcalina de excedentes industriais. Em relação à transformação digital, são descritos desenvolvimentos com aplicação às terraplenagens, aos pavimentos rodoviários e à via-férrea (morfologia das partículas de agregado de balastro). Os exemplos apresentados no artigo demonstram a capacidade geotécnica que as empresas e as instituições do sistema científico e tecnológico em Portugal têm para o cumprimento das metas estabelecidas para a sustentabilidade e resiliência no setor das infraestruturas de transporte.

No trabalho apresentado por **Pistone, Gouveia, Plasencia, Figueiredo e Vieira** (Pistone et al., 2024), é analisada a temática associada à conquista do espaço subterrâneo. Neste documento foi

agregada a informação partilhada na sessão de comemoração dos 50 anos da SPG e 75 anos do LNEC. No mesmo evento foi divulgada a organização da Comissão Portuguesa de Túneis e Espaço Subterrâneo (CPT), assim como os principais objetivos, atividades realizadas e constituição dos vários grupos de trabalho que integram a CPT.

Matos Fernandes (Matos Fernandes, 2024) apresenta o trabalho que incide sobre o ensino e investigação da geotecnia nas universidades em Portugal. O trabalho passa em revista, de forma sintética, o ensino e a investigação em geotecnia nas universidades portuguesas ao longo das últimas 8 décadas. Essa retrospectiva começa na década de 1940, na qual foram identificadas as primeiras ações significativas. Para o período após 2010, no essencial a última década, apresenta-se uma análise mais desenvolvida, que identifica graves dificuldades que afetam atualmente a qualidade da formação geotécnica e o número de engenheiros civis saídos das universidades com essa formação, bem como a renovação do corpo docente necessário para a ministrar. O trabalho termina com duas propostas.

Finalmente, no trabalho de **Mateus de Brito** (Mateus de Brito, 2024) é apresentado o Projeto Cápsula do Tempo e a história da geotecnia em Portugal. No âmbito do projeto Heritage Time Capsule, da International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), a Sociedade Portuguesa de Geotecnia tem vindo a desenvolver ações relativas à história da geotecnia em Portugal. Descrevem-se os objetivos do projeto e as ações já desenvolvidas. Apresentam-se os principais aspetos da contribuição dada pela Sociedade Portuguesa de Geotecnia e descreve-se, de forma sucinta, a história da geotecnia em Portugal nos últimos 100 anos. Explicitam-se os acontecimentos que influenciaram a evolução histórica, dando relevo às contribuições geotécnicas que foram determinantes nessa evolução, não só da conceção e do projeto, mas também das técnicas construtivas dos vários tipos de obras geotécnicas portuguesas.

Os artigos que integram o presente número da revista evidenciam de forma notável a evolução e capacidade técnica e científica da geotecnia portuguesa. Os Editores deste número extra agradecem o contributo de todos os autores e estão certos de que esta publicação, pela atualidade e abrangência dos temas, será uma excelente forma de divulgação da história da geotecnia em Portugal pelas gerações mais jovens nas componentes de ensino, investigação e técnica e de grande utilidade para a comunidade geotécnica.

Este número especial de la revista Geotecnia, que conmemora el quincuagésimo aniversario de la Sociedad Portuguesa de Geotecnia y el septuagésimo quinto aniversario del Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil, presenta un conjunto de artículos de alto interés técnico y científico que abordan temas muy diversos, desde los geosintéticos hasta la transición eco-digital de las infraestructuras del transporte, incluido el espacio subterráneo, y también la enseñanza y la investigación en geotecnia en las universidades portuguesas. El último artículo aborda el Proyecto Cápsula del Tiempo y, en particular, la historia de la geotecnia en Portugal.

En el trabajo presentado por **Lopes y Barroso** (Lopes y Barroso, 2024) se aborda un concepto importante asociado a la durabilidad de los geosintéticos, desde la perspectiva del factor de sostenibilidad. El artículo muestra que, paralelamente a la utilización exitosa de los geosintéticos en innumerables aplicaciones, se han superado grandes desafíos para permitir su imposición en el mercado, muchos de ellos relacionados con la durabilidad. Así, si en una primera fase hubiera sido necesario superar la cuestión de la durabilidad, teniendo en cuenta la vida útil de las obras geotécnicas-ambientales en las que fueron (y son) aplicados, actualmente se cuestiona su excesiva longevidad, poniendo en cuestión su sostenibilidad.

Barroso, Caldeira, Ferreira, França y Maligno (Barroso et al., 2024) presentan el trabajo sobre la aplicación de geosintéticos en la impermeabilización de embalses en la isla de Madeira,

destacando los embalses de las presas de Pico da Urze y Portela. Estas infraestructuras tienen en común la particularidad de que las características de las formaciones geológicas volcánicas que se presentan y los materiales de construcción de las presas no garantizan la retención de agua, siendo imprescindible el uso de geosintéticos en la impermeabilización de estas balsas. El uso de estos materiales planteó algunos desafíos en cuanto al diseño y construcción de los sistemas de impermeabilización, siendo de destacar el importante papel del Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil en el seguimiento de estas obras.

El trabajo presentado por **Neves, Moutinho, Freire, Paixão, Monteiro, Parente, Cristelo y Correia** (Neves et al., 2024) trata sobre la geotecnia en la transición eco-digital de las infraestructuras de transporte, recopilándose ejemplos de investigación, desarrollo e innovación portugueses relacionados con la transición verde y la transformación digital en el ámbito de la geotecnia en el transporte, asociados a movimientos de tierras, pavimentos y ferrocarriles. En el ámbito de la transición verde, se presentan ejemplos de aplicación de materiales no convencionales y renovables y de técnicas de estabilización basadas en la activación alcalina de excedentes industriales. En relación con la transformación digital, se describen desarrollos aplicables a movimientos de tierras, pavimentos de carreteras y ferrocarriles (morfología de las partículas de balasto). Los ejemplos presentados en el artículo demuestran la capacidad geotécnica que tienen las empresas e instituciones del sistema científico y tecnológico en Portugal para alcanzar los objetivos establecidos para la sostenibilidad y la resiliencia en el sector de las infraestructuras del transporte.

En el trabajo presentado por **Pistone, Gouveia, Plasencia, Figueiredo y Vieira** (Pistone et al., 2024) se analiza la temática asociada a la conquista del espacio subterráneo. En este documento se incluye información ya presentada en la sesión de celebración de los 50 años de SPG y 75 años de LNEC. En este acto se dio a conocer la organización de la Comisión Portuguesa de Túneles y Espacios Subterráneos (CPT), así como los principales objetivos, las actividades realizadas y la constitución de los distintos grupos de trabajo que integran la CPT.

Matos Fernandes (Matos Fernandes, 2024) presenta un trabajo centrado en la enseñanza e investigación de la geotecnia en las universidades de Portugal. El trabajo revisa, de forma sintética, la enseñanza y la investigación en geotecnia en las universidades portuguesas durante las últimas 8 décadas. Esta retrospectiva comienza en la década de 1940, en la que se identificaron las primeras acciones significativas. Para el período posterior a 2010, esencialmente la última década, se presenta un análisis más desarrollado, que identifica algunas dificultades serias que actualmente afectan a la calidad de la formación geotécnica y al número de ingenieros civiles que se gradúan en las universidades con esta formación, así como a la renovación del profesorado necesario para su enseñanza. El trabajo finaliza con dos propuestas.

Finalmente, el trabajo de **Mateus de Brito** (Mateus de Brito, 2024) presenta el Proyecto Cápsula del Tiempo y la historia de la geotecnia en Portugal. En el marco del proyecto Heritage Time Capsule, de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE), la Sociedad Portuguesa de Geotecnia viene desarrollando acciones relacionadas con la historia de la ingeniería geotécnica en Portugal. Se describen los objetivos del proyecto y las acciones ya desarrolladas. Se presentan los principales aspectos de la contribución de la Sociedad Portuguesa de Geotecnia y se describe brevemente la historia de la geotecnia en Portugal durante los últimos 100 años. Se explican los acontecimientos que influyeron en la evolución histórica, destacando las contribuciones geotécnicas que fueron decisivas en esta evolución, no sólo en el ámbito del proyecto, sino también en las técnicas constructivas de los distintos tipos de obras geotécnicas portuguesas.

Los artículos incluidos en este número de la revista demuestran de forma notable la evolución y la capacidad técnica y científica de la geotecnia portuguesa. Los editores de este número temático desean agradecer a todos los autores su contribución y están seguros de que esta publicación, debido a la actualidad y alcance de los temas, será una excelente manera de difundir la historia de la

geotecnia en Portugal entre las generaciones más jóvenes que se incorporan a la docencia, la investigación y la técnica, y será también de gran utilidad para la comunidad geotécnica en general.

This extra issue of the “Geotecnia” journal emerges from commemorating the fiftieth anniversary of the Portuguese Geotechnical Society and the seventy-fifth anniversary of the National Laboratory for Civil Engineering, and provides a collection of articles of significant historical, technical, and scientific value. These articles cover a broad spectrum of topics, ranging from geosynthetics to the eco-digital transition of transport infrastructures, including underground spaces. Additionally, the issue includes discussions on geotechnical teaching and research in Portuguese universities. The final article delves into the time capsule project, focusing on the history of geotechnics in Portugal.

The study presented by **Lopes and Barroso** (Lopes and Barroso, 2024) addresses a critical concept related to the durability of geosynthetics, examining it through the lens of stigma or sustainability factors. The article illustrates that, despite the successful utilization of geosynthetics in numerous applications, their adoption faced significant challenges and stigmas, particularly concerning their durability. Initially, efforts were oriented towards overcoming durability issues to ensure the longevity of geotechnical and environmental projects incorporating geosynthetics. However, as these materials proved durable over time, questions regarding their excessive longevity have emerged, potentially jeopardizing their sustainability.

Barroso, Caldeira, Ferreira, França, and Maligno (Barroso et al., 2024) presented a study on the application of geosynthetics in waterproofing reservoirs located on the island of Madeira, specifically focusing on the Pico da Urze and Portela dams. These structures share a common challenge: the geological formations of volcanic origin and the construction materials used in the dams do not inherently provide the necessary waterproofing. Therefore, the use of geosynthetics becomes essential to ensure the waterproofing of the reservoirs. The application of geosynthetics in these contexts has introduced several challenges concerning the design and construction of waterproofing systems. The study emphasizes the crucial role played by the National Laboratory for Civil Engineering in monitoring the construction work associated with these reservoirs.

The article presented by **Neves, Moutinho, Freire, Paixão, Monteiro, Parente, Cristelo, Correia** (Neves et al., 2024) addresses the role of geotechnics in the eco-digital transition of transport infrastructures. The study compiles national examples of research, development, and innovation related to the green transition and digital transformation within the field of geotechnics, particularly in relation to earthworks, pavements, and railways. As part of the green transition, the article describes examples of applying non-conventional and renewable materials, as well as stabilization techniques based on the alkaline activation of industrial surpluses. In the context of the digital transformation, the study describes advancements applicable to earthworks, road pavements, and railways, including also a focus on the morphology of ballast aggregate particles. The examples presented in the article illustrate the geotechnical capabilities of companies and institutions within the scientific and technological system in Portugal. These capabilities illustrate their efforts to meet sustainability and resilience goals within the transport infrastructure sector.

In the article presented by **Pistone, Gouveia, Plasencia, Figueiredo, Vieira** (Pistone et al., 2024), the focus is on the exploration of the theme associated with the conquest of underground space. This document compiles the information shared during the session commemorating the 50th anniversary of SPG (Portuguese Geotechnical Society) and the 75th anniversary of LNEC (National Laboratory for Civil Engineering). It describes the scope of the Portuguese Commission of Tunnels and Underground Space (CPT), as well as the main tasks of the CPT, the activities it has undertaken, and the constitution and work of various working groups within the commission.

Matos Fernandes (Matos Fernandes, 2024) presents an article on the teaching and research of geotechnics in Portuguese universities. The work briefly reviews teaching and research in geotechnics at Portuguese universities over the last eight decades. This retrospective begins in the 1940s, when the first significant actions were identified. For the period after 2010, essentially the last decade, a more developed analysis is presented, which identifies serious difficulties currently affecting the quality of geotechnical training and the number of civil engineers leaving universities after this training, as well as the renewal of the teaching staff needed to deliver it. The paper ends with two proposals.

Finally, **Mateus de Brito** (Mateus de Brito, 2024) presents the Time Capsule Project and the history of geotechnics in Portugal. As part of the Heritage Time Capsule project organised by the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), the Portuguese Geotechnical Society has been carrying out work on the history of geotechnics in Portugal. The project's objectives and the actions already carried out are described. The main aspects of the contribution made by the Portuguese Geotechnical Society are presented and the history of geotechnics in Portugal over the last 100 years is briefly described. The events that have influenced the historical evolution are explained, emphasising the geotechnical contributions that have been decisive in this evolution, not only in conception and design, but also in the construction techniques of the various types of Portuguese geotechnical works.

The articles in this extra issue are a remarkable demonstration of the evolution and technical and scientific capacity of Portuguese geotechnics. The Editors of this issue are grateful for the contribution of all authors and are certain that this publication, due to the timeliness and coverage of its topics, will be an excellent way of disseminating the history of geotechnics in Portugal among younger generations in the components of teaching, research and technique, and of great use to the geotechnical community.

Alexandre Pinto, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, JETsj, Portugal
Laura Caldeira, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCES

- Barroso, M.; Caldeira, L.; Ferreira, P. F.; França, P.; Maligno, C. (2024). *Albufeiras na ilha da Madeira: (imprescindível) impermeabilização com geossintéticos*. Geotecnia No. Extra 2024, pp. 21-40. https://doi.org/10.14195/2184-8394_extra2024_1_2
- Lopes, M. G.; Barroso, M. (2024). *A durabilidade dos geossintéticos: estigma ou fator de sustentabilidade*. Geotecnia No. Extra 2024, pp. 9-19. https://doi.org/10.14195/2184-8394_extra2024_1_1
- Mateus de Brito, J. (2024). *O projeto cápsula do tempo e a história da geotecnia em Portugal*. Geotecnia No. Extra 2024, pp. 125-161. https://doi.org/10.14195/2184-8394_extra2024_1_6
- Matos Fernandes, M. (2024). *Ensino e investigação da Geotecnia nas universidades em Portugal. Uma perspetiva sobre as últimas oito décadas*. Geotecnia No. Extra 2024, pp. 103-123. https://doi.org/10.14195/2184-8394_extra2024_1_5

- Neves, J.; Moutinho, J.; Freire, A. C.; Paixão, A.; Monteiro, B.; Parente, M.; Cristelo, N. Correia, A. G. (2024). *A geotecnia na transição eco-digital das infraestruturas de transporte*. Geotecnia No. Extra 2024, pp. 41-78. https://doi.org/10.14195/2184-8394_extra2024_1_3
- Pistone, R. S.; Gouveia, J.; Plasencia, N.; Figueiredo, J. N.; Vieira, G. D. (2024). *A conquista do espaço subterrâneo*. Geotecnia No. Extra 2024, pp. 79-102. https://doi.org/10.14195/2184-8394_extra2024_1_4

A DURABILIDADE DOS GEOSSINTÉTICOS: ESTIGMA OU FATOR DE SUSTENTABILIDADE

The durability of geosynthetics: stigma or sustainability factor

Maria da Graça Lopes^a, Madalena Barroso^b

^a Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal.

^b Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

RESUMO – Este artigo pretende mostrar que, paralelamente ao sucesso da utilização dos geossintéticos em inúmeras aplicações, estes tiveram sempre de superar grandes desafios/estigmas para se impor no mercado, muitos deles relacionados com a sua durabilidade: numa 1ª fase era questionado se a sua durabilidade seria suficiente, tendo em consideração a vida útil das obras geotécnico-ambientais em que eram (e são) aplicados e mais recentemente, questionando a sua durabilidade excessiva, pondo em causa a sua sustentabilidade. Assim, pretende-se mostrar que a durabilidade dos geossintéticos é e sempre foi um fator de sustentabilidade e desmistificar esse estigma.

ABSTRACT – This paper intends to show that in parallel with the success of the use of geosynthetics in numerous applications, significant challenges/stigmas to impose themselves on the market had to be overcome, many regarding queries on durability: first, querying if the geosynthetics durability would be sufficient to go along with the service life of the geoenvironmental applications in which they were (and are) used. More recently querying their excessive durability, undermining its sustainability. Thus, it is intended to show that the durability of geosynthetics is and has always been a sustainability factor and to demystify that stigma.

Palavras Chave – Geossintéticos, durabilidade, sustentabilidade.

Keywords – Geosynthetics, durability, sustainability.

1 – INTRODUÇÃO

Os geossintéticos (geotêxteis, geogrelhas, georredes, geomembranas, geossintéticos bentoníticos, geocompósitos, etc.) são materiais sintéticos, fabricados a partir de polímeros distintos (dependendo da sua estrutura molecular, processo de fabrico e aditivos utilizados) usados em inúmeras aplicações de engenharia, com várias funções (separação, filtro, dreno, proteção, controle de erosão, estabilização, reforço e barreira). Os geotêxteis são usados principalmente como separação, filtro, reforço ou dreno. As geogrelhas são usadas como reforço para melhorar a resistência do solo ou de outros materiais. As georredes são usadas para drenagem. As geomembranas e geossintéticos bentoníticos são usados como barreiras em obras hidráulicas e armazenamento de resíduos. Um geocompósito, consistindo na combinação de um ou mais geossintéticos, pode desempenhar diferentes funções dependendo da aplicação e dos materiais que o incorporam.

O primeiro geotêxtil foi usado na construção de estradas nos Estados Unidos da América em 1920 (Keller e Berry, 2017). O primeiro geotêxtil para controle de erosão foi usado em 1950 na Flórida por Barrett (Barret, 1966). Em 1960, os geotêxteis foram extensivamente usados para

E-mails: graca.lopes@isel.pt (M. Lopes), mbarroso@lnec.pt (M. Barroso)

ORCID: orcid.org/0000-0002-6852-7955 (M. Lopes), orcid.org/0000-0002-0862-055X (M. Barroso)

controle de erosão, tanto na Europa como nos EUA. Em 1970, Giroud usou geotêxteis tecidos e não-tecidos como um filtro no paramento de montante da barragem de terra de Valcros (Giroud, 1992). Em 1971, Wager iniciou o uso de geotêxteis tecidos como reforço para aterros construídos em solos moles (Holtz e Massarsch, 1976).

A Figura 1(a) mostra como foi no início a evolução do mercado dos geossintéticos. A Figura 1(b) mostra como nos dias de hoje o mercado dos geossintéticos ainda não parou de crescer, perspetivando-se uma taxa de crescimento de 5,7% até ao final da atual década.

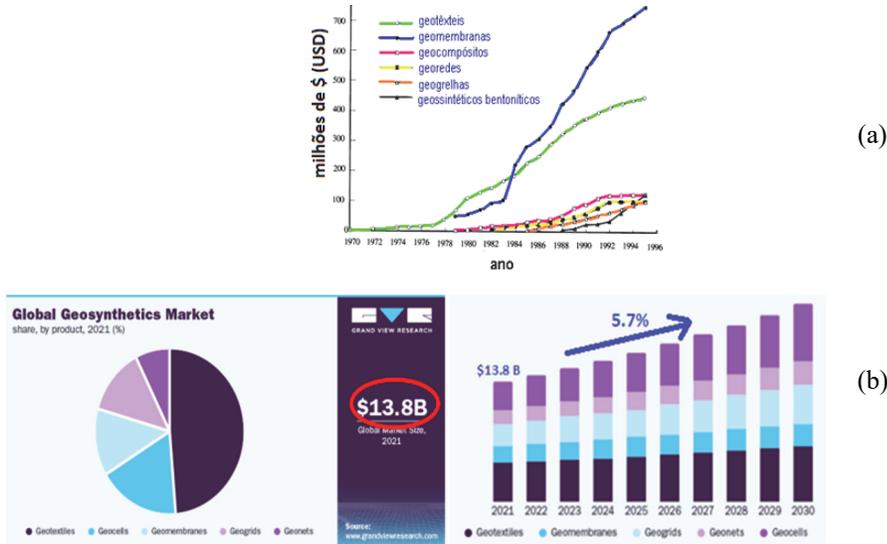


Fig. 1 – A evolução histórica do mercado dos geossintéticos e perspetiva futura.

Face a estes dados, pode afirmar-se que os geossintéticos tiveram um desenvolvimento extremamente rápido e diversificado (veja-se na Figura 1(a) a multiplicidade de materiais geossintéticos desenvolvidos). Mas, neste percurso de sucesso os geossintéticos tiveram de superar vários estigmas/desafios para se impor no mercado e substituir os materiais naturais ou, juntamente com estes, melhorar o comportamento das obras onde foram aplicados.

2 – O SUCESSO E OS DESAFIOS DOS GEOSSINTÉTICOS

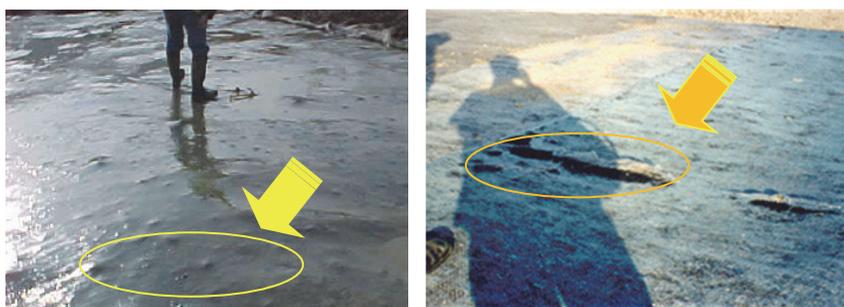
Nas últimas cinco décadas o emprego de geossintéticos tem vindo sempre a crescer, não só no número de aplicações e diversidade de campos de aplicação, mas também na importância do papel (funções) que têm vindo a desempenhar nas obras onde são incorporados, em áreas tão distintas como obras subterrâneas, obras hidráulicas, obras de suporte, obras de controlo da erosão, infraestruturas rodoviárias e ferroviárias e armazenamento de resíduos (Figura 2).



Fig. 2 – Diversidade de campos de aplicação dos geossintéticos (Guler, 2021; IGS, 2021).

Os geossintéticos começaram por desempenhar funções secundárias, mas pelo seu desempenho ao longo dos anos, conquistaram o papel principal em muitas obras de engenharia, aumentando a importância das funções desempenhadas (separação, filtro, dreno, proteção, controle de erosão, estabilização, reforço e barreira). Como referido anteriormente, neste percurso foi necessário superar vários desafios/estigmas, para se impor no mercado, contribuindo para melhorar o comportamento das infraestruturas onde são aplicados, nomeadamente sobre:

- qualidade do seu fabrico, para não pôr em causa o seu futuro desempenho
- suscetibilidade a danos físicos (Figura 3(a)) durante o seu transporte e aplicação, sendo necessário garantir a sua integridade nesse período, para não comprometer o seu desempenho durante a sua vida útil
- desconhecimento de instrumentos de dimensionamento
- desconhecimento do seu comportamento sob determinadas condições de utilização
- durabilidade, nomeadamente devido à:
 - suscetibilidade a ataques químicos (hidrólise e oxidação). Quanto à hidrólise é necessário cuidado ao especificar geossintéticos para ambientes com $\text{pH} \geq 9$. Relativamente à oxidação, para as poliolefinas (PP e PE), existem aditivos (antioxidantes e estabilizadores de UV) para retardar ou impedir que este fenómeno ocorra
 - suscetibilidade aos ultravioletas (Figura 3(b)). Existem estabilizadores (e.g. negro de carbono) para retardar ou impedir que este fenómeno ocorra. Em muitas aplicações os geossintéticos ficam cobertos, pelo que esta garantia se circunscreve ao período de armazenamento e instalação



(a)

(b)

Fig. 3 – Suscetibilidade dos geossintéticos a danos físicos (a) e aos UV (b).

Contudo, a maior parte dos problemas relatados envolvendo a aplicação de geossintéticos são sobretudo devido à má seleção, ao incorreto dimensionamento ou à deficiente técnica de aplicação destes materiais e não devido a problemas de durabilidade, até porque a sua vida útil pode ser aumentada, bastando para tanto juntar alguns aditivos durante o fabrico.

3 – A INCERTEZA DA VIDA ÚTIL DOS GEOSSINTÉTICOS

Devido ao estigma da perda no desempenho a longo prazo dos geossintéticos, inúmeros estudos de envelhecimento acelerado e ensaios forenses foram realizados, mas mais do que estes, o desempenho real nas diversas obras em que os geossintéticos foram aplicados, mostram que os receios existentes eram infundados (Figura 4):

- Quando utilizados com a função de separação em infraestruturas rodoviárias, os geossintéticos têm mostrado o seu bom desempenho por mais de 30-40 anos. Em camadas

betuminosas, os geossintéticos reduzem os custos de manutenção e proporcionam uma vida útil duas a três vezes superior à da mesma instalação sem geossintéticos

- Na função de reforço em estruturas de suporte têm demonstrado terem uma vida útil de 50 anos, ou mais
- Em canais, estações de tratamento de águas residuais e outras infraestruturas similares, os geossintéticos também mostraram ter uma vida útil de décadas (30-40 anos)
- Em aterros de resíduos (perigosos, industriais ou domésticos) são usados quase todo o tipo de geossintéticos e em grande escala, protegendo as águas subterrâneas, o meio ambiente e a saúde humana. Por exemplo, a expectativa de vida útil das barreiras geossintéticas (vulgarmente designadas por geomembranas) em aterros de resíduos é de mais de quatro séculos.

- em infraestruturas rodoviárias > 40 anos



- em estruturas de suporte > 50 anos



- em canais, estações de tratamento de águas > 30-40 anos



Fig. 4 – Durabilidade dos geossintéticos em diferentes aplicações (Guler, 2021; IGS, 2022; IGS, 2021; GSI, sem data).

Contudo, como todos materiais de engenharia, devem ser usados apropriadamente. Deve haver um projeto específico para cada tipo de obra e local, cumprimento rigoroso das especificações de construção e proteção adequada dos geossintéticos pós-construção. A sua seleção também deve ser efetuada com base nas propriedades de engenharia necessárias e não apenas no preço.

Quando se pensava que o estigma da incerteza da vida útil dos geossintéticos tinha sido superado, este tema surge de novo, mas agora colocando o problema de forma inversa, ou seja, o receio da durabilidade dos geossintéticos ser excessiva, pondo em causa a sua sustentabilidade.

4 – A DURABILIDADE E A SUSTENTABILIDADE DOS GEOSSINTÉTICOS

As enormes quantidades de plástico produzidas no mundo, a dependência da população em relação a esse material, o seu elevado tempo de decomposição e a incapacidade de lidar apropriada e ecologicamente com esses materiais têm alarmado organismos internacionais, ONGs, ativistas, membros da sociedade civil e governos (eCycle, sem data). Por isso, é muito importante fazer a distinção dos plásticos que são realmente necessários para a sociedade e quais os que são realmente descartáveis e definir abordagens diferentes para cada grupo.

Nos dias que correm, o plástico é visto por alguns como um material problemático. Parece que se vive numa época de “PLASTICOFOBIA”. No entanto, o momento é de crescente importância e presença de materiais sintéticos/plásticos em áreas como a medicina, eletrônica, aeronáutica, indústria automobilística, alimentar, vestuário, calçado, entre outras, com inúmeros benefícios para a sociedade (Callapez, 2019). Para evitar o sentimento populista de “colocar todos os produtos sintéticos no mesmo saco”, é necessário um entendimento adequado desses materiais para alcançar uma imagem positiva e um desenvolvimento sustentável e inovador daqueles que sejam considerados absolutamente necessários.

Assim, para os geossintéticos é fundamental mostrar, por um lado a sua importância e, em muitos casos, a sua imprescindibilidade nas obras em que são aplicados (e a importância vital dessas obras para a humanidade) e, por outro lado, demonstrar que, relativamente a outras soluções alternativas, são mais sustentáveis.

No ano 2015 os Estados-membros da Organização das Nações Unidas (ONU) aprovaram a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável para os 15 anos seguintes, que estabeleceu 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Figura 5).



Fig. 5 – ODS - Objetivos de desenvolvimento sustentável (ONU, 2015).

Dixon *et al.* (2017) foram os primeiros autores a mencionar a agenda 2030 e o papel que os geossintéticos poderiam desempenhar para alcançar alguns destes objetivos. Seguidamente mostra-se como os geossintéticos podem ser importantes para atingir alguns destes objetivos (IGS, 2021a).

4.1 – A importância dos geossintéticos na agricultura (ODS 2)

Com a previsão da população mundial ultrapassar os 10 mil milhões até 2100, é vital para um mundo saudável, melhorar a eficiência agrícola e controlar os gases nocivos das operações agrícolas. Os geossintéticos na agricultura podem contribuir, nomeadamente (IGS, 2021a):

- protegendo contra a erosão do solo, por meio da inclusão de geotêxteis de coco e juta que se degradam e, no caso da juta, evitam que os pesticidas sejam libertados nas águas de irrigação
- protegendo os tubos de drenagem, ajudando os agricultores a manter adequados grau de saturação e estabilização do solo
- atuando como cobertura do solo:
 - controlam o crescimento das culturas. Os geotêxteis não tecidos podem permitir a livre circulação da água, ar, fertilizantes e nutrientes, enquanto fornecem um ambiente que evita o excesso de água e aceleram o crescimento das culturas;
 - protegem contra as pragas, excesso de vento e sol, durante o crescimento e armazenamento
- reduzindo a infiltração de água, prevenindo a erosão das margens e melhorando a qualidade da água nas pisciculturas
- atuando como barreiras impermeáveis na criação de ambientes para a agricultura urbana

4.2 – A importância dos geossintéticos na preservação da água (ODS 6)

A escassez de água é um problema global. Em 2015, as Nações Unidas revelaram que a escassez de água afetava dois quintos da população mundial. A solução está num melhor controle do armazenamento e da distribuição da água. Os geossintéticos (sobretudo na sua função de barreira) desempenham um papel fundamental na captura, transporte, armazenamento e distribuição de água potável em barragens, canais, reservatórios e condutas, nomeadamente (IGS, 2021a):

- impedindo as fugas quando as geomembranas são usadas como barreira em canais (está comprovado que os revestimentos com geomembranas têm 10 vezes menos fugas do que os revestimentos em betão)
- possibilitando o transporte de água em túneis hidráulicos
- preservando a qualidade e o abastecimento de água, evitando a sua contaminação, quando utilizados como revestimento e cobertura de reservatórios
- necessitando de uma menor quantidade de água para a sua produção (dos geossintéticos) relativamente a soluções alternativas (por exemplo a indústria do betão é o segundo maior consumidor de água depois da agricultura)

4.3 – A importância dos geossintéticos no desenvolvimento económico (ODS 8 e ODS 9)

O uso de geossintéticos em aplicações de engenharia civil muitas vezes fornece benefícios financeiros, reduzindo o custo de materiais naturais, reduzindo o desperdício e geralmente proporcionando um uso mais eficiente dos recursos em comparação com soluções tradicionais baseadas em solo, betão e aço (Jones, 2015). Em muitos casos, o benefício económico é tal que o uso de geossintéticos tornou-se a prática mais comum, podendo contribuir nomeadamente (IGS, 2021a):

- gerando redução de custos ao:
 - reduzir a quantidade ou a necessidade de usar solos em obras de engenharia civil
 - acelerar a construção
 - melhorar o desempenho a longo prazo, reduzindo as reparações e as perturbações associadas
 - melhorar a sustentabilidade
- contribuindo para o crescimento económico no âmbito de grandes investimentos em infraestruturas de engenharia civil
- protegendo a economia, mitigando as catástrofes naturais e as perdas económicas resultantes

- contribuindo para a realização de economias significativas no plano ambiental, incluindo uma maior rapidez construtiva e a redução do uso de materiais e de manutenções

4.4 – A importância dos geossintéticos nas infraestruturas de transporte (ODS 9)

No mundo atual, infraestruturas de transporte eficazes e modernas podem quebrar barreiras entre línguas e culturas, assim como criar oportunidades. Um mundo unido é um mundo melhor. Seja unindo áreas isoladas ao resto do mundo, abrindo possibilidades económicas a pessoas anteriormente excluídas, ou aumentando a produtividade por meio da redução dos tempos de transporte, os geossintéticos podem contribuir, nomeadamente (IGS, 2021a):

- facilitando a construção de estradas: na separação de camadas e na estabilização da base da infraestrutura, para além de assegurarem simultaneamente a drenagem lateral
- podendo ser usados para separar e reforçar as camadas de suporte das ferrovias, promovendo uma boa drenagem, prevenindo a contaminação do balastro e dissipando as tensões associadas ao movimento e ao peso dos comboios

4.5 – A importância dos geossintéticos na proteção do ambiente (ODS 13 e ODS 15)

A gestão criteriosa de resíduos, o emprego de métodos construtivos racionais e sensatos e a prevenção da contaminação da água, devido à erosão e à infiltração, são essenciais para a prosperidade do nosso planeta. Os geossintéticos estão na vanguarda em termos de ajuda à preservação da qualidade do ambiente, assegurando a proteção contra a contaminação, abaixo e acima da superfície do solo, e contribuindo para uma melhoria constante dos métodos construtivos com reduzida pegada ecológica (emissão de dióxido de carbono). Os geossintéticos podem contribuir, nomeadamente (IGS, 2021a):

- evitando a contaminação causada pelos resíduos, quando usados como barreiras em aterros sanitários
- evitando a infiltração de água e a migração de gás nos sistemas de cobertura dos aterros de resíduos
- evitando a contaminação causada por resíduos radioativos através do seu armazenamento temporário impermeabilizando-os com geomembranas
- reduzindo os riscos ambientais associados às atividades mineiras, por meio do seu uso em sistemas de impermeabilização em pilhas de lixiviação, barragens de rejeitados, lagoas e canais
- facilitando o tratamento de águas residuais quando usados em leitos de macrófitas
- promovendo a desidratação de lamas por meio de tubos de geotêxtil
- reduzindo as emissões de gases de efeito estufa, durante a construção de obras, por permitirem o uso conjunto com materiais naturais de origem local

4.6 – A importância dos geossintéticos na mitigação de catástrofes naturais (ODS 15)

Inundações, deslizamentos de terra e secas podem causar mortes e devastações. À medida que a população, os aglomerados populacionais e as alterações climáticas aumentam, a Terra vai sofrer pressões nunca sentidas. Os geossintéticos podem contribuir, nomeadamente (IGS, 2021a):

- prevenindo a erosão costeira e ajudando a criar unidades hidráulicas de absorção de energia, estáveis sob a ação do seu peso, estruturalmente seguras (adequadas) para zonas costeiras
- providenciando ao longo do litoral um ambiente de recife artificial com geotêxteis, seguro para os humanos, ao mesmo tempo em que atraem plantas e animais marinhos logo após a construção
- protegendo contra inundações enquanto parte integrante de barragens novas ou reabilitadas, atuando como filtros horizontais ou verticais, reforçando os diques de proteção, protegendo a superfície contra a erosão e prevenindo os danos causados por animais escavadores

- fornecendo uma proteção a curto prazo contra inundações utilizando conjuntamente solos locais
- protegendo contra deslizamentos de terra, prevenindo a erosão do solo e reforçando, estabilizando e consolidando os taludes suscetíveis a terremotos, ventos fortes ou à erosão por rios
- podendo funcionar como soluções técnicas para monitorização contínua durante eventos climáticos extremos, combinando, por exemplo, geotêxteis com fibras óticas, permitindo medir a temperatura ou detetando precocemente zonas instáveis.

4.7 – A sustentabilidade das soluções com geossintéticos

Após mostrar a importância dos geossintéticos para o desenvolvimento sustentável do nosso planeta, em cerca de metade dos objetivos (ODS 2, 6, 8, 9, 13 e 15) considerados fundamentais, é agora importante mostrar a sustentabilidade das soluções com geossintéticos relativamente a soluções alternativas tradicionais, nomeadamente usando outros materiais manufaturados (o betão) ou materiais naturais (solos).

Existem inúmeras abordagens válidas que podem ser usadas para avaliar a sustentabilidade de uma determinada solução de engenharia, incluindo aspetos sociais, ambientais e económicos. No entanto, como os acordos e metas internacionais são definidos com base nas emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEE), essa é uma medida (pragmática) que pode ser usada para avaliar se os geossintéticos constituem uma solução de engenharia sustentável (Dixon *et al.*, 2017).

Pode-se definir Sustentabilidade como a capacidade do ser humano interagir com o mundo, preservando o meio ambiente para não comprometer os recursos naturais das gerações futuras (Wikipédia, sem data) e definir-se Carbono Incorporado (CI) como a soma do impacto de todas as emissões de gases de efeito estufa atribuídas a um material ao longo de seu ciclo de vida (abrange desde a sua extração, ao fabrico, aplicação (ou construção), manutenção, até o fim da vida útil e o seu descarte) (Koerner *et al.*, 2019).

O método da pegada de carbono permite quantificar as emissões totais de GEE (independentemente do tipo de gás emitido, que se pode converter em dióxido de carbono equivalente) causadas direta e indiretamente por uma pessoa, organização, evento ou produto. A pegada de carbono cobre todas as emissões ao longo da vida de um produto, serviço ou solução, sendo CI um indicador das emissões de carbono acumuladas na solução adotada (Dixon *et al.*, 2017).

A Figura 6 mostra um exemplo de como se pode quantificar o CI de um material geossintético.

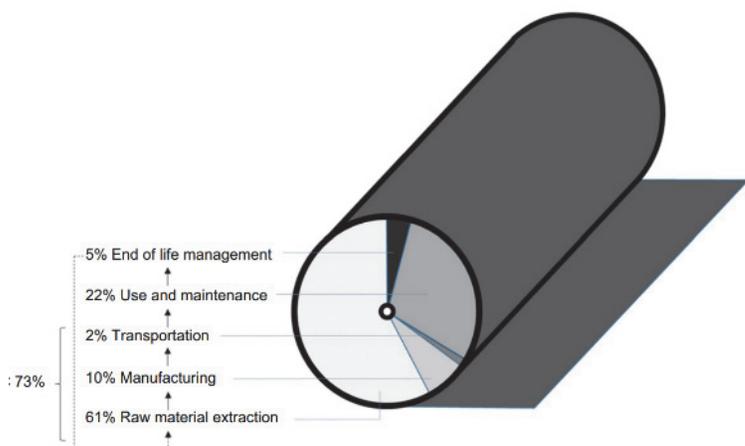


Fig. 6 – Exemplo de quantificação de CI de um geossintético (Dixon *et al.*, 2017)

A comparação da pegada de carbono calculada para as diferentes soluções alternativas pode ser usada para selecionar a opção mais "sustentável". A título de exemplo mostra-se na Figura 7 a comparação da pegada de carbono de uma cobertura de um aterro de resíduos, efetuada de forma tradicional (usando diferentes camadas de solo) e uma cobertura efetuada com geomembrana exposta, tendo-se concluído que se obtém uma redução de 82% da pegada de carbono na cobertura com geomembrana exposta (Koerner *et al.*, 2019).

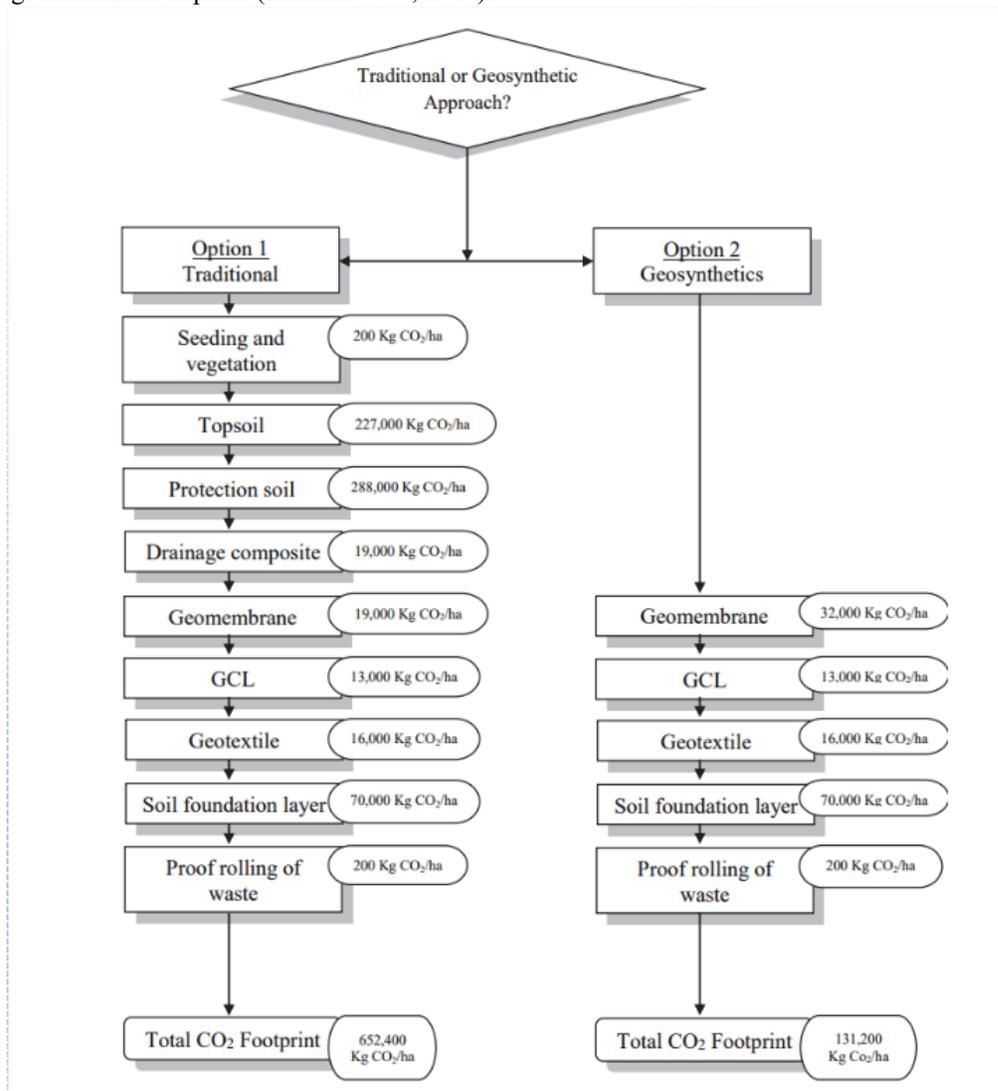


Fig. 7 – Comparação da pegada de carbono de uma cobertura de aterro de resíduos tradicional versus uma cobertura com geossintéticos (Koerner *et al.*, 2019)

A Associação Europeia dos Fabricantes de Geossintéticos solicitou um estudo sobre a sustentabilidade de soluções que usam materiais de construção tradicionais versus soluções com geossintéticos. As conclusões da análise efetuada são relatadas por Stucki *et al.* (2011). O estudo forneceu informações qualitativas e quantitativas abrangentes sobre a sustentabilidade de materiais de construção geralmente aplicados (betão) versus geossintéticos. A motivação foi fornecer aos membros daquela Associação as ferramentas que poderiam usar para comunicar os benefícios dos

geossintéticos aos donos de obra, projetistas e empreiteiros. Foram considerados quatro tipos de aplicação: filtração; estabilização de fundações; drenagem de aterros de resíduos; e muros de contenção. Mas outros estudos têm sido reportados para outras aplicações de geossintéticos (Dixon *et al.*, 2017).

De uma forma geral pode concluir-se que os geossintéticos são importantes para o desenvolvimento sustentável porque, como referido por Koerner (2012):

- podem substituir matérias-primas escassas
- podem simplificar os projetos combinando os geossintéticos com o solo ou outros materiais
- podem tornar possíveis projetos anteriormente impossíveis
- têm normalmente um custo competitivo relativamente a soluções alternativas tradicionais
- têm uma pegada de carbono muito inferior à de soluções alternativas tradicionais

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo pretendeu-se mostrar a importância dos geossintéticos e em muitos casos a sua imprescindibilidade nas obras em que são aplicados (e a importância vital dessas obras para a humanidade). Pretendeu-se, igualmente, demonstrar que, relativamente a outras soluções alternativas, a solução com geossintéticos é mais sustentável:

- mostrou-se como os geossintéticos podem contribuir para a sustentabilidade do planeta em áreas fundamentais (e tão diversificadas) como a agricultura, preservação da água, desenvolvimento económico, infraestruturas de transportes, proteção do meio ambiente e na mitigação de catástrofes naturais, em conformidade com os objetivos de desenvolvimento sustentável definidos pela ONU, em 2015
- mostrou-se como a sustentabilidade das soluções com geossintéticos relativa a outras soluções alternativas tradicionais (com betão ou solo), pode ser comprovada através da pegada de carbono
- mostrou-se que uma das maiores contribuições dos geossintéticos para a sustentabilidade é a sua durabilidade, pois esta propriedade permite aumentar o desempenho (e reduzir a necessidade de manutenção) e a vida útil das obras de engenharia em que são inseridos, economizando-se recursos, custos e tempo

A preservação do ambiente como um todo e, especificamente, dos seus recursos naturais é da maior importância para as gerações atuais e futuras. Neste contexto, os geossintéticos podem fornecer soluções de engenharia sustentáveis para problemas geotécnicos e geoambientais, reduzindo o consumo de materiais naturais e causando menor impacto no ambiente.

Grande parte do ruído negativo sobre o uso de plásticos baseia-se na desinformação. Existe uma enorme discrepância, por exemplo, entre os materiais de plástico que flutuam no oceano, e os geossintéticos (plásticos) que realmente protegem a vida marinha, prevenindo por exemplo a erosão costeira.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barret, R.J. (1966). *Use of plastic filters in coastal structures*. Proceedings of the 16th International Conference Coastal Engineers, Tokyo, September. <https://doi.org/10.9753/icce.v10.61>

Callapez, M.E. (2019). *Plástico nosso de cada dia. Um olhar sobre as histórias dos plásticos*. SIC notícias, 20 de junho.

Dixon, N.; Fowmes, G.; Frost, M. (2017). *Global challenges, geosynthetic solutions and counting carbon*. *GeosyntheticsInternational*, 24, (5), pp. 451–46. <https://doi.org/10.1680/jgein.17.00014>

- eCycle (sem data). *Impactos do plástico no meio ambiente*. Acedido em 19/01/2023. [<https://www.ecycle.com.br/tempo-de-decomposicao-do-plastico>].
- Giroud, J.P. (1992). *Geosynthetics in dams. Two decades of experience*. Geotechnical Fabrics Report 10 (10):5, July/August.
- GSI (sem data). *Liner & installation for wastewater*. Geosynthetics.com.
- Guler, E. (2021). *Geosynthetic Functions*. IGS University Online Lecture Series.
- Holtz, R.D.; Massarsch, K.R. (1976). *Improvement of the stability of an embankment by piling and reinforced Earth*. Proceedings of the 6th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vienna, Austria, vol. 1.2.
- IGS (2021). *Retrofitting Irrigation Canals with Geosynthetics: Seepage Control*. Technical Committee on Hydraulics (TC-H).
- IGS (2021a). *Preparar o terreno para um futuro promissor como é que os geossintéticos servem a sociedade após meio século*. Ebook, versão portuguesa. Comissão Portuguesa de Geossintéticos. Acedido em 23 de janeiro de 2023. [https://www.geosyntheticsociety.org/wp-content/uploads/2021/10/IGS_Ebook_Portuguese_V4.pdf]
- IGS (2022). *Fonctions des Géosynthétiques*. Leaflets.
- Jones, D.R.V. (2015). *Using geosynthetics for sustainable development*. Proceedings of the 2nd International GSI-Asia Geosynthetics Conference, Seoul, Korea.
- Keller, G.R.; Berry, J. (2017). *History of geosynthetics use on national forest roads*. Geosynthetics. ATA Publications, June.
- Koerner, R.M. (2012). *Designing with Geosynthetics*. 6th ed, Xlibris, Bloomington, IN, USA.
- Koerner, R.M.; Koerner J.R.; Koerner G.R. (2019). *Relative sustainability (i.e., embodied carbon) calculations with respect to applications using traditional materials versus geosynthetics*. GSI White Paper #41. Geosynthetic Institute.
- ONU (2015). *Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável e os seus 17 ODS*. Cimeira de Nova Iorque. Resolução tomada a 25 de setembro.
- Stucki, M.; Büsser, S.; Itten, R.; Frischknecht, R.; Wallbaum, H. (2011). *Comparative Life Cycle Assessment of Geosynthetics Versus Conventional Construction Materials*. Report for the European Association of Geosynthetic Manufacturers. ESU-services GmbH and ETH Zürich, Uster, Switzerland.
- Wikipédia (sem data). *Sustentabilidade*. Acedido em 26 de setembro 2022. [<https://pt.wikipedia.org/wiki/Sustentabilidade>].

ALBUFEIRAS NA ILHA DA MADEIRA: (IMPRESINDÍVEL) IMPERMEABILIZAÇÃO COM GEOSSINTÉTICOS

Water reservoirs on Madeira Island: (essential) waterproofing with geosynthetics

Madalena Barroso^a, Laura Caldeira^a, Pedro França Ferreira^b, Paulo França^b, Carlos Maligno^c

^a Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

^b Empresa de Eletricidade da Madeira, Portugal,

^c ARM – Águas e Resíduos da Madeira, S.A., Portugal

RESUMO – Na ilha da Madeira, existem vários reservatórios de água para diferentes fins, entre eles as albufeiras das barragens de Pico da Urze e da Portela. Estas infraestruturas têm em comum a particularidade de as características das formações geológicas vulcânicas ocorrentes e os materiais de construção das barragens não garantirem a estanquidade necessária para a retenção da água, tornando imprescindível o uso de geossintéticos na impermeabilização do corpo das barragens e das suas albufeiras. Na Barragem do Pico da Urze foi utilizado um geocompósito de impermeabilização (geomembrana de PVC termoacoplada a um geotêxtil) e na Barragem da Portela foi usada uma geomembrana de PEAD. A utilização destes materiais colocou alguns desafios ao nível da conceção e construção dos seus sistemas de impermeabilização. Neste artigo, apresentam-se os principais desafios enfrentados durante as fases de projeto e de construção dos sistemas de impermeabilização, que o Laboratório Nacional de Engenharia Civil acompanhou no âmbito de assessorias técnicas prestadas aos donos de obra.

ABSTRACT – The island of Madeira has several water reservoirs for different purposes, including the Pico da Urze and Portela dams. A common feature of these infrastructures is that the characteristics of the volcanic geological formations and the materials used in the construction of the dams do not guarantee the necessary waterproofing, making the use of geosynthetics in lining systems essential. A geocomposite (PVC geomembrane thermally coupled to a geotextile) was used in the Pico da Urze dam and a PEAD geomembrane in the Portela dam. The use of these materials presented some challenges in terms of the design and construction of their lining systems. This paper presents the main challenges faced during the design and construction of the lining systems, which were supported by the *Laboratório Nacional de Engenharia Civil* as part of the technical assistance provided to the dam owners.

Palavras Chave – barragem, albufeira, formações vulcânicas, sistema de impermeabilização, geossintéticos.

Keywords – dam, reservoir, volcanic formations, lining system, geosynthetics.

E-mails: mbarroso@lnec.pt (M. Barroso), laurac@lnec.pt (L. Caldeira), pferreira@cem.pt (P. Ferreira), pfranca@cem.pt (P. França), carlos.maligno@arm.pt (C. Maligno)

ORCID: orcid.org/0000-0002-0862-055X (M. Barroso), orcid.org/0000-0002-9164-2118 (L. Caldeira)

1 – INTRODUÇÃO

Na ilha da Madeira existem vários reservatórios de água para diversos fins, tais como o abastecimento às populações, a irrigação ou a produção de energia. Entre os reservatórios existentes, contam-se as albufeiras das barragens do Pico da Urze e da Portela, doravante designadas por BPU e BP.

A BPU localiza-se na ribeira do Alecrim, no Concelho da Calheta. É uma infraestrutura integrada no Projeto de Ampliação do Aproveitamento Hidroelétrico da Calheta, cujo objetivo é aumentar a capacidade de produção de energia do Sistema Hidroelétrico da Calheta através da sua associação à produção de energia eólica e da adoção de sistemas reversíveis.

A BP situa-se na ribeira do Passa Remos, no Concelho de Machico. Foi construída com vista ao melhoramento da rede de rega do concelho de Machico.

Estas infraestruturas têm em comum a particularidade de que as características das formações geológicas vulcânicas ocorrentes e os materiais usados na construção do corpo das barragens não garantem a estanquidade necessária à retenção da água, tornando imprescindível a utilização de geossintéticos nos sistemas de impermeabilização.

Os geossintéticos mais utilizados em sistemas de impermeabilização deste tipo de obras são as geomembranas, os geotêxteis e os geocompósitos (constituídos, pelo menos, por dois tipos de geossintéticos diferentes, unidos em fábrica). As geomembranas desempenham a função de barreira (retenção/armazenamento da água), os geotêxteis as funções de proteção da geomembrana, drenagem e filtragem, e os geocompósitos desempenham sempre mais do que uma das funções descritas, por exemplo, barreira e proteção (geocompósito de impermeabilização, substituindo o conjunto geomembrana e geotêxtil), ou drenagem e filtragem (geocompósito drenante em substituição do conjunto geotêxtil filtrante e georrede drenante).

Os geossintéticos podem ser fabricados a partir de diferentes materiais poliméricos. No fabrico de geomembranas, os polímeros mais usados são o polietileno de alta densidade (PEAD), o cloreto de polivinilo (PVC), o polietileno de baixa densidade (PEBD), o polipropileno (PP) e o polietileno clorosulfanado (CSPE) e, no fabrico de geotêxteis, o PP, o poliéster (PET), o PEAD e a poliamida (PA).

A função de barreira foi assegurada por uma geomembrana de PVC unida em fábrica a um geotêxtil (geocompósito de impermeabilização), na BPU, e por uma geomembrana de PEAD, na BP. A utilização destes materiais trouxe alguns desafios de projeto e de construção dos seus sistemas de impermeabilização, destacando-se os seguintes: (i) o dimensionamento e a construção do sistema de ancoragens dos geossintéticos; (ii) as exigências de desempenho da camada de apoio dos geossintéticos e a sua preparação; (iii) o sistema de drenagem subsuperficial; (iv) as ligações entre os geossintéticos e as estruturas de betão; e (v) a implementação de procedimentos de garantia de qualidade de instalação dos geossintéticos.

O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) prestou assessoria técnica aos donos de obra, designadamente à Empresa de Eletricidade da Madeira, durante as fases de projeto, de construção e de exploração da BPU, e à Empresa IGA – Investimento e Gestão da Água, S.A., presentemente denominada ARM – Águas e Resíduos da Madeira, S.A., durante a fase instalação dos geossintéticos na BP.

No âmbito dos geossintéticos, a intervenção do LNEC teve por objetivo assessorar os donos de obra na solução das questões que a utilização desses materiais levantou.

Neste artigo, descrevem-se as características gerais das obras, a constituição dos sistemas de impermeabilização e apresentam-se os principais desafios enfrentados durante as fases de projeto e/ou de construção dos sistemas de impermeabilização das barragens do Pico da Urze e da Portela e respetivas albufeiras.

2 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS OBRAS

2.1 – Barragem do Pico da Urze e sua albufeira

A BPU localiza-se no Paul da Serra, no Concelho da Calheta. Tem o coroamento à cota 1354 m, com um desenvolvimento de 620 m e uma largura de 8 m (Figura 1). A altura máxima da barragem acima da fundação é de 31 m.



Fig. 1 – Vista geral da BPU.

A barragem é constituída por um aterro de enrocamento com um sistema de impermeabilização, com geossintéticos, colocado sobre uma camada de betão projetado (armado com uma geogrelha, a montante) e sobre um geotêxtil de proteção e de drenagem. O geotêxtil encontra-se ligado a 4 tubos de drenagem (diâmetro de 80 mm, espaçados de 6 m) na zona a cotas mais baixas do paramento de montante, para permitir o escoamento da água potencialmente afluyente entre o geocompósito de impermeabilização e a camada de betão projetado. O paramento de montante tem uma forte inclinação, de 1(V):1,4(H), com uma banquetta intermédia, a cota variável (mínima 1335 m), e o paramento de jusante é, ainda mais inclinado, 1(V):1,2(H).

A albufeira é alimentada pela ribeira do Alecrim e pela levada Velha do Paul. Tem um volume de armazenamento de, aproximadamente, 1 hm³, em parte obtido por escavação do maciço natural. Tem o nível de pleno armazenamento a 1352 m, o nível de máxima cheia a 1352,6 m e o nível mínimo de exploração a 1332,2 m.

O fundo da albufeira foi modelado através de duas plataformas, uma localizada a montante, à saída do canal de entrada da ribeira do Alecrim, à cota 1332 m, e outra a jusante, na zona da torre de tomada de água, à cota 1329 m, bem como uma zona de transição, de inclinação constante e igual a 2%, para compatibilizar as pendentes do sistema de drenagem sob a geomembrana e do fundo da albufeira, na zona inclinada. Os taludes de escavação têm inclinação variável entre 1(V):3(H) e 1(V):1,7(H), e uma banquetta intermédia, aproximadamente, à cota 1338 m.

2.2 – Barragem da Portela e sua albufeira

A BP situa-se na freguesia de Santo António da Serra, no Concelho de Machico. Tem o coroamento à cota 740 m, com um desenvolvimento de cerca de 140 m e uma largura de 6 m (Figura 2). Tem 19,5 m de altura máxima acima do talvegue do curso de água a jusante e 22 m acima da cota de fundação.



Fig. 2 – Vista geral da BP.

A barragem é constituída por um aterro de terra homogéneo, com um volume de 70 000 m³, formado por solos resultantes da desagregação de tufos vulcânicos. Dispõe de um tapete drenante no contacto da fundação com o maciço estabilizador de jusante. Os paramentos têm inclinação de 1(V):1,5(H).

A albufeira é alimentada pela ribeira do Passa Remos (afluente da margem direita da ribeira do Machico). O curso de água apresenta características marcadamente torrenciais, com forte declive longitudinal do talvegue e elevada capacidade de erosão.

A albufeira tem um volume de armazenamento de cerca de 87 800 m³, conseguido por escavação, e taludes inclinados de 1(V):1(H). O nível de pleno armazenamento situa-se à cota 738,5 m.

Tanto o paramento de montante da barragem, como a albufeira têm uma banquetta intermédia à cota 734 m.

3 – CONSTITUIÇÃO DOS SISTEMAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO

Na BPU, o sistema de impermeabilização é constituído, do topo para a base, por um geocompósito de impermeabilização, formado por uma geomembrana de PVC, com 2,5 mm de espessura, termoacoplada a um geotêxtil de PP, não tecido, agulhado, com massa por unidade de área de 700 g/m². O geocompósito desempenha simultaneamente as funções de barreira e de

proteção contra o punçamento por partículas de dimensão controlada presentes na camada subjacente.

Na Figura 3 apresenta-se uma vista geral da obra antes e após a construção do sistema de impermeabilização.



Fig. 3 – Vista geral da obra: (a) antes da construção do sistema de impermeabilização; (b) após a construção do sistema de impermeabilização.

Na BP, o sistema de impermeabilização é constituído por uma geomembrana de PEAD, com 2,5 mm de espessura, com a função de barreira, e por um geotêxtil de PP, não tecido, agulhado, com massa por unidade de área de 600 g/m², com a função de proteção da geomembrana contra o punçamento.

Na Figura 4 apresenta-se uma vista geral da obra durante os trabalhos de terraplenagem e após a construção do sistema de impermeabilização da albufeira.



Fig. 4 – Vista geral da obra: (a) durante os trabalhos de terraplenagem; (b) após a construção do sistema de impermeabilização.

As maiores diferenças entre os sistemas de impermeabilização das duas barragens prendem-se com o tipo de geomembranas utilizadas (PVC, na BPU, e PEAD, na BP) e o seu acoplamento, ou não, ao geotêxtil de proteção contra o punçamento, unidos em fábrica, no caso do geocompósito de impermeabilização, ou aplicados em separado.

Segundo Vertematti (2004), teoricamente, os dois tipos de geomembranas (de PVC e de PEAD) apresentam vantagens e inconvenientes, apresentando-se no Quadro 1 os mais relevantes, sendo a sua opção definida pelas condições de utilização.

Quadro 1 – Vantagens e inconvenientes das geomembranas de PVC e PEAD (adaptado de Vertematti, 2004).

Geomembrana	Vantagens	Inconvenientes
PVC	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada resistência mecânica - Elevada elasticidade - Elevada estabilidade térmica - Elevado atrito 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixa resistência química - Fraco desempenho a temperaturas altas e baixas
PEAD	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada resistência química - Elevada resistência à tração - Elevada resistência à deformação uniaxial - Bom desempenho a baixas temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo atrito (GM lisas) - Grande suscetibilidade à fissuração (<i>stress cracking</i>) - Comportamento plástico - Baixa resistência à deformação multiaxial

Na BPU assumiu particular relevância a elevada elasticidade da geomembrana de PVC quando solicitada por condições extremas devido à ação do vento, por esvaziamentos frequentes da albufera e por deformações impostas devido à ocorrência de assentamentos na fundação da albufera, constituída, em alguns locais, por solos moles, ou de assentamentos diferenciais entre zonas mais rígidas e menor rigidez. Na BP as condições eram menos gravosas.

Relativamente à utilização de geocompósito de impermeabilização *versus* aplicação em separado de geomembrana e de geotêxtil, de acordo com o ICOLD (2010), o primeiro é vantajoso, pois apresenta menor suscetibilidade ao deslizamento devido ao acoplamento do geotêxtil à geomembrana, uma vez que será esta interface a mais desfavorável no seu dimensionamento.

4 – PRINCIPAIS DESAFIOS DE PROJETO

4.1 – Sistema de ancoragem dos geossintéticos

Um dos principais desafios que se colocaram ao projeto foi o dimensionamento do sistema de ancoragem dos geossintéticos para: (i) resistir à ação do vento; (ii) evitar o deslizamento sob ação do peso próprio; e (iii) evitar roturas de tração ou de arranque na zona de coroamento.

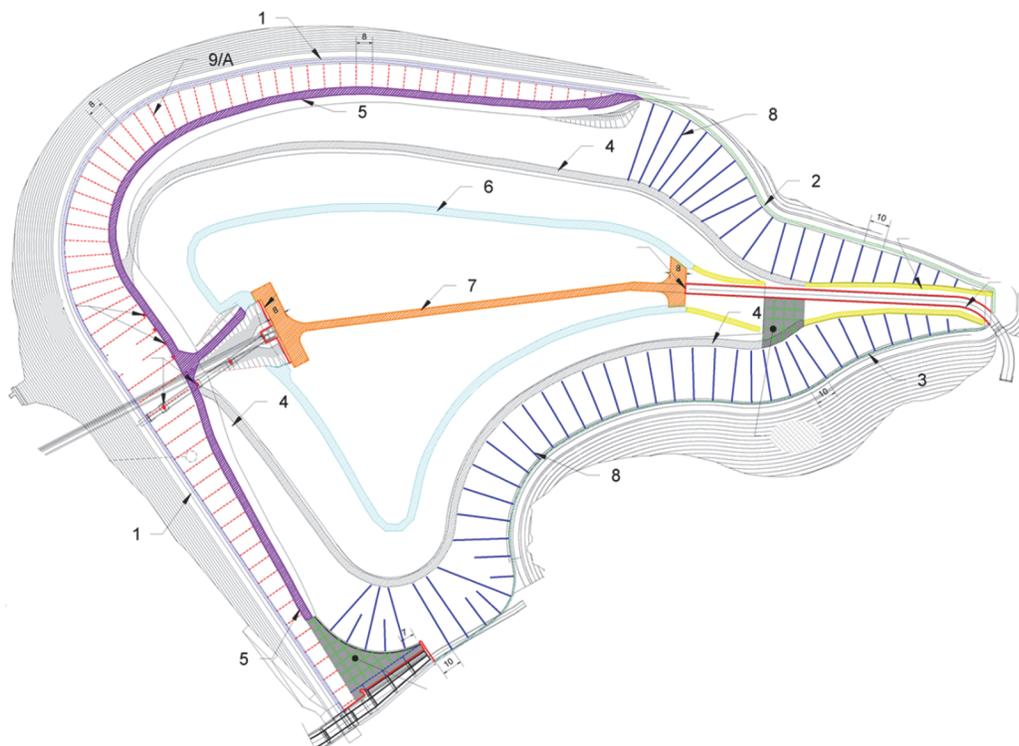
A ação do vento é importante durante a fase de instalação, onde podem ser adotadas soluções de amarração provisórias, mas é relevante sobretudo durante a fase de exploração especialmente aquando do esvaziamento da albufera. O vento pode originar ações de sucção suficientes para provocar o levantamento dos geossintéticos, o rasgamento, ou mesmo, o arrancamento dos geossintéticos e dos seus pontos de fixação.

Na BPU, em face da ação do vento da região, verificou-se que não seria possível garantir a segurança e a durabilidade da solução com uma configuração tradicional das ancoragens, localizadas essencialmente na crista, em banquetas se existentes e na base de taludes, pelo que se adotou uma configuração bastante flexível, essencialmente constituída por ancoragens ao longo dos taludes, sendo o seu espaçamento calculado de modo a verificar os estados limites relevantes para o sistema. Deste modo, o sistema de ancoragem dos geossintéticos concebido inclui os seguintes elementos:

- valas perimetrais em betão no coroamento da barragem e na crista dos taludes da albufera;
- balastros materializados por lajes de betão colocados nas banquetas intermédias, no pé dos taludes de escavação, no pé dos taludes do fundo da albufera, e no alinhamento central do fundo da albufera;
- fixações mecânicas constituídas por chapas metálicas colocadas no paramento de montante da barragem e nos taludes superiores da albufera; no paramento de montante da barragem, as chapas metálicas foram fixadas à camada de betão projetado através de ancoragens mecânicas expansivas e, nos taludes superiores da albufera, foram fixadas a valas de

ancoragem em betão, construídas segundo a linha de maior declive antes da colocação dos geossintéticos, através de ancoragens químicas.

Na Figura 5 apresenta-se uma planta da barragem do Pico da Urze e sua albufeira com o sistema de ancoragens.



Legenda

- 1 – Vala trapezoidal em betão no coroamento da barragem
- 2 – Vala retangular (1m×0,5m) em betão na crista dos taludes da albufeira
- 3 – Vala retangular (0,8m×0,5m) em betão na crista dos taludes da albufeira
- 4 – Balastro na banquetta intermédia à cota 1338 m
- 5 – Balastro na banquetta intermédia a cota variável (mínimo 1335 m)
- 6 – Balastro no pé do talude
- 7 – Balastro no alinhamento central do fundo da albufeira
- 8 – Fixações mecânicas às valas de betão (taludes superiores da albufeira)
- 9/A – Fixações mecânicas ao betão projetado (paramento de montante da barragem)

Fig. 5 – Planta da barragem do Pico da Urze e sua albufeira com o sistema de ancoragens (adaptado de CARPI, 2019).

É de salientar que, nos taludes com ancoragens segundo a linha de maior declive, foram também adotadas ancoragens no topo e na base, constituindo elementos redundantes que reforçam a segurança, mas que não foram contabilizados no dimensionamento.

O dimensionamento dos elementos de ancoragem foi realizado adotando coeficientes de segurança globais mínimos, entre as forças resistentes e as forças atuantes, de 1,5 e de 1,1,

respetivamente, para velocidades do vento de 90 km/h, para o vento habitual, e de 150 km/h, para o vento excecional (CARPI, 2018).

No projeto, foram verificados os seguintes estados limites últimos:

- tração do geocompósito;
- corte das soldaduras;
- levantamento das ancoragens;
- deslizamento das ancoragens;
- derrubamento das ancoragens.

De entre as verificações mencionadas, salienta-se o cálculo do levantamento do geocompósito de impermeabilização devido à sucção provocada pela ação do vento, o qual foi realizado com base na metodologia proposta por Giroud (1995). Foi definido como levantamento máximo admissível para o geocompósito o valor de 2 m, para a ocorrência de um vento excecional (CARPI, 2019).

Com base no valor do levantamento definido, foram calculados os espaçamentos a adotar entre as chapas metálicas nos taludes superiores de escavação da albufeira (entre a crista e a banquetta à cota 1338 m) e no paramento de montante da barragem (entre o coroamento e a banquetta a cota variável), os quais foram de 10 m e de 8 m, respetivamente.

Na BP, em face da ação do vento da região e das dimensões da obra, o sistema de ancoragens dos geossintéticos concebido é constituído pelos seguintes elementos (Figura 6):

- valas de ancoragem em betão, de forma retangular, no coroamento da barragem e na crista dos taludes (à cota 740 m);
- vala de ancoragem em betão, forma trapezoidal, na banquetta intermédia da barragem (à cota 734 m).

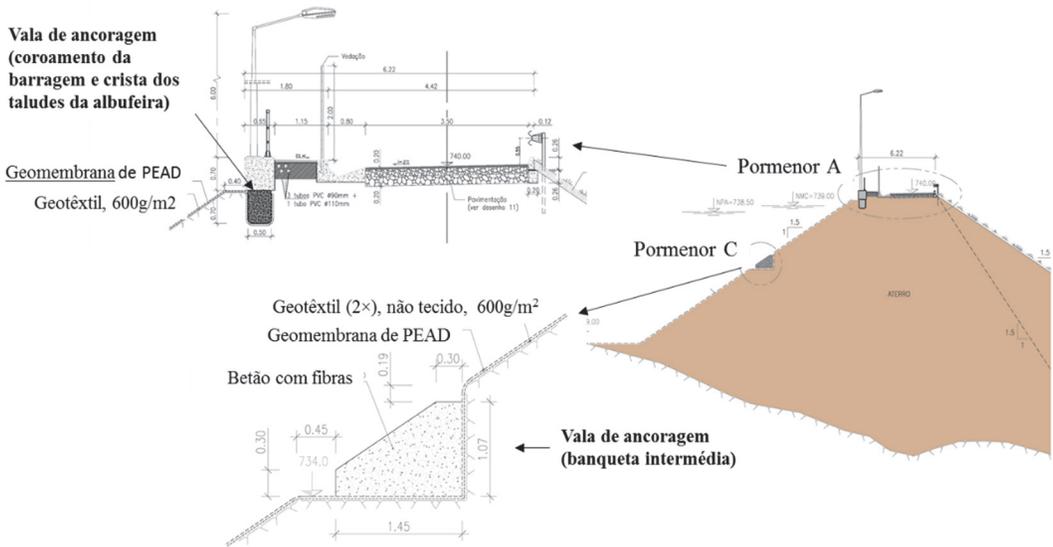


Fig. 6 – Sistema de ancoragens na barragem da Portela.

O dimensionamento dos elementos de ancoragem foi realizado com base na verificação da sua estabilidade face à ação de um vento com velocidade de 80 km/h. Foram verificados os seguintes estados limites últimos:

- levantamento da geomembrana no fundo da albufeira vazia;
- levantamento da geomembrana no fundo da albufeira, considerando um nível mínimo de exploração à cota 728,5 m (0,5 m acima da cota do fundo da albufeira);
- tração da geomembrana.

Os coeficientes de segurança de globais obtidos foram, respetivamente, 1,9; 16,0; e 15,4.

4.2 – Requisitos da camada de apoio dos geossintéticos

O punçoamento dos materiais da camada de apoio sob os geossintéticos, sobretudo, sob a geomembrana/geocompósito de impermeabilização constitui uma das maiores causas de danos, comprometendo o desempenho dos sistemas de impermeabilização.

A geomembrana/geocompósito de impermeabilização deve ser colocada sobre uma superfície regular, isenta de fragmentos rochosos, lama, detritos, vegetação, fissuras por secagem excessiva, exsurgências, zonas instáveis e materiais contundentes. Quando as características da camada de apoio não cumprem os requisitos referidos, devem ser desenvolvidas especificações de projeto que garantam a integridade das barreiras.

Na albufeira da BPU, o paramento de montante da barragem era de enrocamento e a superfície dos taludes resultantes da escavação do maciço e do fundo da albufeira era constituída por zonas rochosas, com arestas vivas, e zonas de solos desagregados ou moles, bastante irregular com cavidades, protuberâncias e desníveis.

Para garantia de um apoio contínuo do geocompósito de impermeabilização e fixação das chapas metálicas das ancoragens, no paramento de montante da barragem foi colocada uma camada de betão projetado, com 0,10 m de espessura, devidamente armado com uma geogrelha.

Para proteção do geocompósito de impermeabilização contra o punçoamento, foram definidos os seguintes requisitos de projeto (CARPI, 2018):

- todos os materiais com arestas vivas, ou outros objetos que causassem protuberâncias superiores a 20 mm, deviam ser removidos;
- as cavidades, ou desníveis, com dimensões superiores a 20 mm, deviam ser preenchidos com solo, devidamente compactado;
- no paramento de montante da barragem, sobre a camada de betão projetado, e junto à torre de tomada de água, foi requerida a colocação de um geotêxtil com massa por unidade área de 1000 g/m², o qual permitia adicionalmente a drenagem de eventuais fugas através do geocompósito de impermeabilização.

Na albufeira da BP, a superfície de apoio constituída pelo paramento de montante da barragem e obtida pela escavação das formações geológicas ocorrentes, era de caráter terroso, não sendo exetável uma presença, significativa, de fragmentos rochosos, com arestas vivas. A necessidade de proteção da geomembrana resultava de se tratar de uma geomembrana de PEAD, com baixa resistência à fissuração (*stress cracking*). Pequenas deformações na geomembrana causadas, por exemplo, por pequenas irregularidades na superfície de apoio, podem induzir tensões na geomembrana (inferiores à tensão de cedência) que conduzem à sua fissuração a longo prazo.

No projeto da BP foi proposto um geotêxtil, com resistência ao punçoamento superior a 7,8 kN e 600 g/m² de massa por unidade de área, para proteção da geomembrana. A colocação de um geotêxtil sobre a superfície de apoio é vantajosa dado que propicia uma superfície ainda mais regular.

4.3 – Sistema de drenagem subsuperficial

Para captação e drenagem da água proveniente do maciço onde se inserem as albufeiras, foram concebidos sistemas de drenagem sob os sistemas de impermeabilização.

Na BPU, o sistema de drenagem sob o geocompósito de impermeabilização é constituído pelos seguintes elementos:

- uma vala de drenagem no pé dos taludes superiores de escavação, na banquetta à cota 1338 m;
- sete descidas de talude, para condução da água para a vala de drenagem do pé dos taludes de escavação no fundo da albufeira;

- uma vala de drenagem perimetral no pé dos taludes de escavação no fundo da albufeira;
- um conjunto de valas de drenagem de ligação da vala de drenagem perimetral do fundo da albufeira à vala de drenagem central;
- uma vala de drenagem central de recolha dos caudais das restantes valas de drenagem e de ligação ao tapete drenante na base do aterro da barragem;
- diversas máscaras drenantes, executadas em zonas com ressurgências de água, para captação dos respetivos caudais e sua condução para as valas de drenagem;
- geotêxteis drenantes, instalados em zonas com humidade.

Na Figura 7 apresenta-se uma planta com a configuração das valas de drenagem subsuperficiais na banqueta intermédia à cota 138m e no fundo da albufeira.

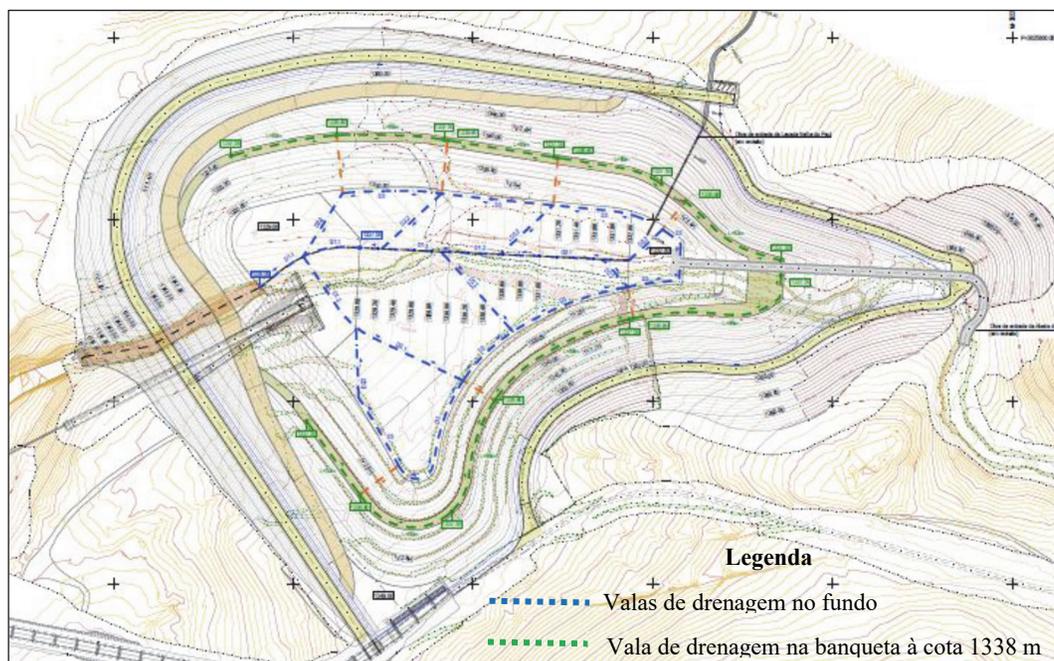


Fig. 7 – Planta com o sistema de drenagem subsuperficial da BPU (adaptado de TPF, 2019).

Na BP, o sistema de drenagem subsuperficial inclui cinco setores independentes, que permitem a leitura individualizada do caudal percolado em cada um dos setores, com vista à fácil identificação dos locais onde possam ocorrer eventuais fugas devido a danos na geomembrana e promover a sua rápida reparação.

O sistema de drenagem é formado tubos de PVC com 110 mm de diâmetro, corrugados e perfurados, dispostos no interior das valas de drenagem no fundo da albufeira. Os tubos de PVC são envolvidos em material granular compactado (diâmetro médio de 4 cm), que por sua vez se encontra envolvido em geotêxtil de filtragem.

Os tubos de PVC perfurados estão ligados a tubos de PVC lisos, com 160 mm, que transportam a água. No extremo de montante do circuito de tomada de água e descarga de fundo, os tubos de recolha são integrados para efeitos de controlo.

Em termos gerais, o sistema de drenagem integra os seguintes elementos:

- uma vala de drenagem perimetral no pé dos taludes de escavação no fundo da albufeira;
- um conjunto de valas de drenagem, dispostas em espinha no fundo da albufeira, ligadas a uma vala de drenagem perimetral do fundo da albufeira e à vala de drenagem central;

- descidas de talude, para condução da água para a vala de drenagem do pé dos taludes de escavação no fundo da albufeira;
- valas de drenagem central, para recolha dos caudais das restantes valas de drenagem e de ligação ao tapete drenante no contacto da fundação com o maciço estabilizador de jusante.

Na Figura 8 apresenta-se uma planta com a configuração das valas de drenagem subsuperficiais no fundo da albufeira da BP.

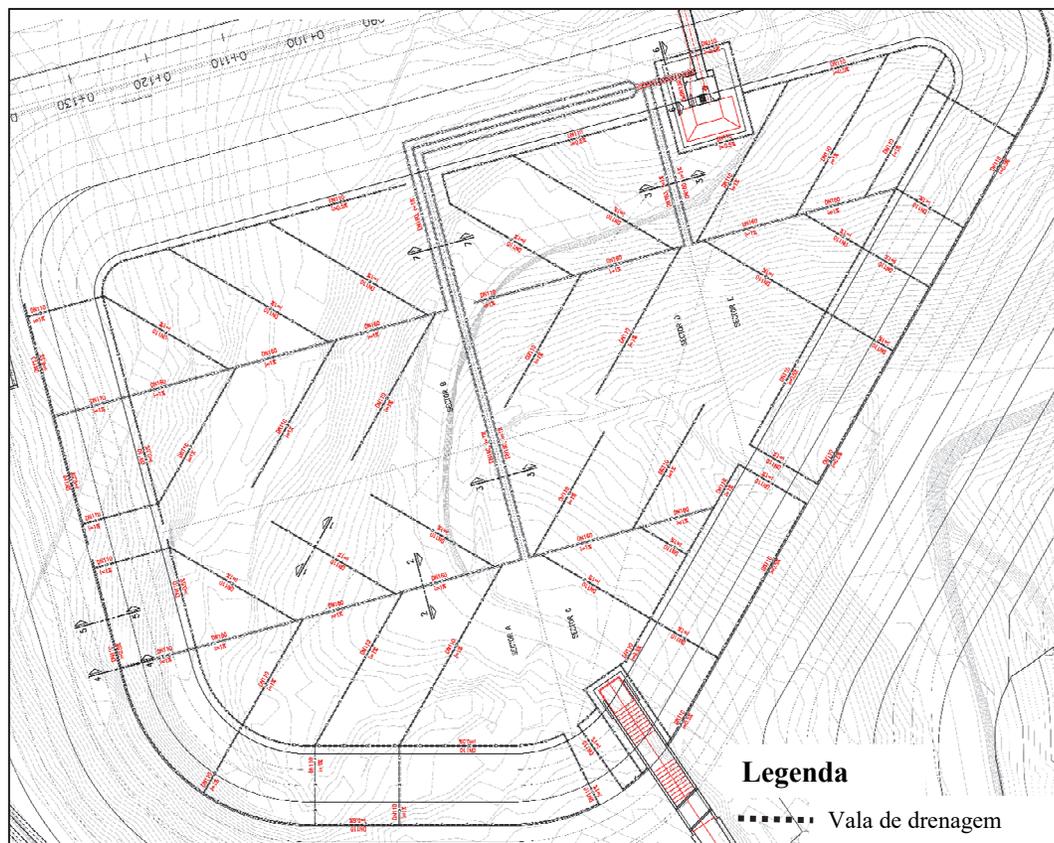


Fig. 8 – Planta com o sistema de drenagem subsuperficial da BP.

5 – PRINCIPAIS DESAFIOS DE CONSTRUÇÃO

5.1 – Sistema de ancoragens dos geossintéticos

Na BPU, o primeiro aspeto a salientar sobre a construção do sistema de ancoragens prende-se com as fixações mecânicas. Nos taludes superiores de escavação da albufeira, as chapas metálicas colocadas sobre o geocompósito de impermeabilização foram ligadas a valas de betão, construídas segundo a linha de maior declive. Estas valas interessaram o talude superior, entre a crista e a banquetta intermédia à cota 1338 m, e foram executadas com um espaçamento de 10 m (Figura 9).

As chapas metálicas foram fixadas às valas em betão por parafusos e buchas químicas, conforme ilustrado na Figura 10.



Fig. 9 – Vista das valas de betão executadas segundo a linha de maior declive nos taludes superiores.



Fig. 10 – Exemplo da fixação das chapas metálicas às valas de betão executadas segundo a linha de maior declive na parte superior dos taludes da albufeira.

No paramento de montante da barragem, as chapas metálicas foram ligadas à camada de betão projetado de 0,10 m espessura, devidamente armado com geogrelha, através de parafusos espaçados de 0,20 m. As chapas metálicas distam 8 m entre si.

Para assegurar a estanquidade do sistema de impermeabilização, as chapas metálicas foram cobertas com uma faixa de geomembrana (Figura 11).



Fig. 11 – Exemplo da colocação da faixa de sobreposição sobre as chapas metálicas no paramento de montante da barragem.

A construção das valas de ancoragem na crista dos taludes da albufeira apresentou algumas dificuldades. Na margem direita, observou-se que os materiais se desagregavam facilmente, continham fragmentos rochosos com dimensões e características incompatíveis com a colocação do geocompósito de impermeabilização e, nem sempre, era respeitada a distância à crista do talude definida, de 0,5 m (Figura 12a). Estes problemas foram solucionados mediante a estabilização da vala de ancoragem com betão, colocando cofragem na face junto ao talude (Figura 12b) e aumentando a distância entre vala de ancoragem e a crista do talude, para 1,0 e 1,5 m, nos locais onde era previsível a existência de material rochoso facilmente desagregável.



Fig. 12 – Vista da vala de ancoragem na crista dos taludes da albufeira: (a) antes da reparação; (b) após a reparação.

Na BP, a execução do sistema de ancoragens, de um modo geral, não levantou grandes dificuldades. Na Figura 13 apresenta-se a execução da vala de ancoragem à cota 734 m.

5.2 – Preparação da superfície de apoio

Na BPU, constatou-se que nem sempre era possível cumprir os critérios de aceitação definidos no projeto, sobretudo nos taludes superiores da albufeira. Eram visíveis locais onde a superfície era muito irregular, com zonas rochosas protuberantes e zonas mais deformáveis.



Fig. 13 – Vista da execução da vala de ancoragem na banquetta intermédia da albufeira à cota 734 m.

Dependendo do incumprimento e da localização e inclinação da superfície, foi adotada uma das seguintes medidas (Figura 14):

- colocação de uma camada de betão projetado, em zonas de rocha fortemente fraturada;
- colocação de geotêxtil de proteção com massa por unidade área de 1000 g/m^2 , em superfícies de maior irregularidade e com partículas de dimensões superiores a 60 mm;
- compactação com auxílio da pá da giratória, em superfícies de menor irregularidade;
- regularização com meios manuais, em zonas com cavidades e/ou com fragmentos rochosos contundentes (preenchimento de cavidades e remoção de fragmentos rochosos);
- passagem com o cilindro de rasto liso (sem vibração), em zonas de menor inclinação dos taludes.



Fig. 14 – Exemplos de regularização da superfície de apoio em curso.

5.3 – Ligações entre o geocompósito de impermeabilização e as estruturas de betão na BPU

Na BPU, a execução das ligações entre o geocompósito de impermeabilização e as estruturas de betão existentes no interior da albufeira (descarregador de cheias, torre de tomada de água e respetivos muros ala, Canal de Entrada da Ribeira do Alecrim e pilares do passadiço) colocou também alguns desafios. Para acomodar os eventuais assentamentos do solo junto às estruturas de betão, o geocompósito devia ser colocado com uma folga (dobra), localizada na zona de transição entre o solo (material que está sujeito a sofrer assentamentos no futuro) e a estrutura, tal como ilustrado, a título de exemplo, na Figura 15.

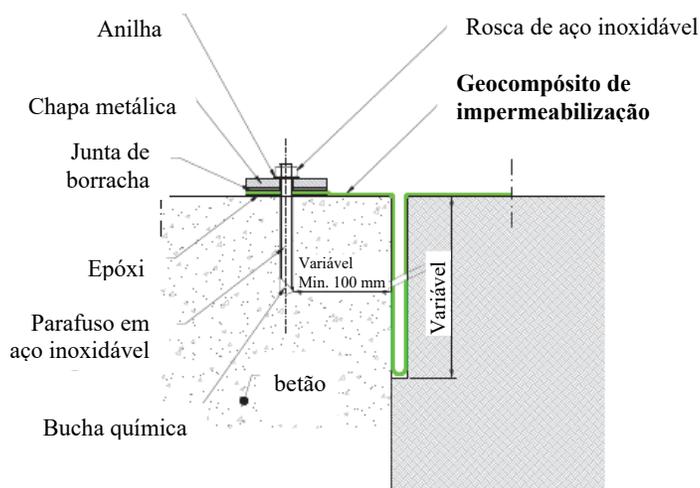


Fig. 15 – Exemplo da ligação entre o geocompósito de impermeabilização e torre de tomada de água (CARPI, 2019).

Durante a execução da ligação entre o geocompósito de impermeabilização e o canal de entrada da ribeira do Alecrim na margem direita da albufeira, verificou-se que a furação se encontrava subida e tinha sido adicionada uma camada de solo junto ao canal, onde estava prevista a dobra de geocompósito. Também, ao longo do canal, o contacto entre a fundação e o solo era irregular, em resultado de a fundação ter sido inadequadamente betonada contra o solo. O LNEC preconizou a remoção do excesso de betão, uma vez que eventuais assentamentos diferenciais não ocorriam no contacto entre a face da fundação e o solo, mas sim no contacto entre a face da fundação irregular e o solo. O projetista, evocando que a fundação do canal era rochosa, não sendo expetável a ocorrência de assentamentos diferenciais significativos, propôs a inserção de uma membrana adicional, de baixo atrito, sob o geocompósito do sistema de impermeabilização, com vista a minimizar o atrito entre o geocompósito e o material de fundação, permitindo ao geocompósito acomodar os eventuais assentamentos que possam vir a ter lugar na transição entre o betão de fundação e o terreno adjacente. Dadas as condições prevaletentes na obra e o prazo apertado para a conclusão da mesma, foi adotada esta solução.

5.4 – Implementação de procedimentos de garantia de qualidade de instalação

5.4.1 – Planos de garantia de qualidade de instalação dos geossintéticos

Os procedimentos de garantia de qualidade de instalação dos geossintéticos nas barragens do Pico da Urze e da Portela foram previamente definidos em Plano de Garantia da Qualidade da Instalação, elaborados pelo LNEC antes do início da instalação dos geossintéticos.

Os Planos têm por objetivo guiar as atividades dos diferentes intervenientes, estabelecer recomendações construtivas e de controlo da instalação, com vista a atingir a máxima qualidade construtiva.

As atividades de garantia de qualidade realizadas pelo LNEC decorreram em simultâneo com as atividades de controlo de construção (autocontrolo) realizadas pelo instalador, complementando-se.

De entre as atividades desenvolvidas, destacam-se as seguintes:

- supervisão dos procedimentos de receção e aceitação dos geossintéticos;
- supervisão dos procedimentos de transporte, manuseamento e armazenamento dos geossintéticos;
- supervisão dos procedimentos de instalação dos geossintéticos e eventual reparação dos mesmos após colocação;
- realização de ensaios destrutivos sobre as soldaduras do geocompósito de impermeabilização;
- verificação dos resultados dos ensaios não destrutivos de autocontrolo do instalador; e
- realização de observações/inspeções, com vista a avaliar a qualidade da instalação dos geossintéticos.

Das atividades referidas destacam-se, neste artigo, as relacionadas com a garantia de qualidade das uniões entre rolos adjacentes de geocompósito de impermeabilização/geomembrana, tipicamente designadas por soldaduras.

A qualidade das soldaduras é determinante para assegurar o bom desempenho do sistema de impermeabilização e deve ser avaliada em termos de resistência mecânica e de estanquidade.

Neste âmbito, as atividades de garantia de qualidade realizadas pelo LNEC, consistiram em:

- colaboração na definição dos critérios de aceitação/rejeição das soldaduras;
- realização de ensaios destrutivos *in situ* e em laboratório: ensaios de arranque (*peel test*) e ensaios de corte (*shear test*), para avaliar a qualidade das soldaduras em termos de resistência mecânica, segundo as frequências especificadas nos respetivos projetos;
- verificação dos resultados dos ensaios não destrutivos do instalador, para avaliar a qualidade das soldaduras em termos de estanquidade, estes ensaios são realizados em todas as soldaduras, sem exceção, e em todo o comprimento.

5.4.2 – Critérios de aceitação/rejeição das soldaduras

No que se refere à resistência mecânica, os critérios de aceitação/rejeição das soldaduras definidos para as barragens do Pico da Urze e da Portela basearam-se nos resultados dos ensaios de arranque e de corte realizados segundo a norma ASTM D 6392.

Nos Quadros 2 e 3 sintetizam-se os critérios de aceitação/rejeição das soldaduras definidos, respetivamente, para a BPU e para a BP, em termos de resistência mecânica. Estes critérios foram adotados tanto nos ensaios de pré-qualificação, realizados diariamente sobre soldaduras experimentais, para confirmação se equipamento funciona adequadamente e se encontra

Quadro 2 – Critérios de aceitação/rejeição para a resistência mecânica das soldaduras do geomembrana de PVC (geocompósito de impermeabilização) na Barragem do Pico da Urze.

Ensaio	Norma	Soldadura dupla (termofusão)	Soldadura simples (manuais, ar quente)
Arranque	ASTM D6392	≥ 11 kN/m	≥ 8 kN/m
Corte		≥ 22 kN/m	≥ 18 kN/m

Quadro 3 – Critérios de aceitação/rejeição para a resistência mecânica das soldaduras de geomembrana de PEAD na Barragem da Portela.

Ensaio	Norma	Soldadura dupla (termofusão)	Soldadura simples (manuais, extrusão)
Arranque	ASTM D6392	$\geq 28,8$ kN/m	$\geq 24,8$ kN/m
Corte		$\geq 38,0$ kN/m	≥ 38 kN/m

devidamente ajustado às condições climáticas, bem como nos ensaios realizados sobre as amostras retiradas das soldaduras realizadas *in situ*.

Como se pode observar nos quadros, os valores mínimos requeridos para a resistência ao arranque e ao corte foram diferentes, apesar das geomembranas empregues nas duas obras apresentarem a mesma espessura. Essa diferença decorre de se tratarem de dois tipos de geomembranas: PVC, na BPU, e PEAD, na BP.

Relativamente à estanquidade, os critérios de aceitação/rejeição definidos para as barragens do Pico da Urze e da Portela basearam-se em ensaios e/ou normas de ensaio diferentes. As soldaduras duplas foram avaliadas com base nos resultados dos ensaios de pressão de ar, segundo as normas ASTM D7177 e ASTM D5820, respetivamente, na BPU e na BP. As soldaduras simples (manuais) foram ensaiadas pelo método da haste metálica (norma ASTM D4437), na BPU, e pelo método elétrico (norma ASTM D 6365), na BP, conforme resumido no Quadro 4 e no Quadro 5. A utilização de ensaios diferentes e/ou normas diferentes nas duas obras prendeu-se com a diferença entre as geomembranas (PVC, na BPU, e PEAD, na BP).

5.4.3 – Ensaio de arranque e de corte

Na BPU, os ensaios de arranque e de corte sobre as soldaduras duplas foram, inicialmente, realizados com uma frequência de 1/150 m de soldadura, conforme o especificado no projeto. Esta frequência foi ajustada, de acordo com o preconizado no Plano de Garantia de Qualidade de Instalação dos Geossintéticos, para 1/200 m de soldadura, após a realização de, aproximadamente, 35% dos ensaios previstos com resultados satisfatórios.

Nesta obra, foram ensaiadas 196 amostras. As amostras foram retiradas em locais não críticos, nomeadamente, no princípio ou no fim da soldadura, com vista à diminuição do número de remendos a efetuar.

Os resultados dos ensaios não cumpriram os critérios de aceitação/rejeição indicados no Quadro 2 em 13,7% das amostras ensaiadas (27 amostras). Estes resultados foram associados a dois problemas. O primeiro envolveu 21 amostras retiradas de soldaduras localizadas no fundo da albufeira (do lado da margem esquerda), e interessou os resultados do ensaio de arranque. Posteriormente, verificou-se que este problema envolvia um maior número de soldaduras, num comprimento total de aproximadamente 2 000 m. O segundo reporta-se a 6 amostras, retiradas nos taludes localizados abaixo do paramento de montante da barragem e no pé do talude inferior, e interessou os resultados do ensaio de corte.

Quanto às soldaduras localizadas no fundo da albufeira (todas efetuadas com a mesma máquina de soldar e pelo mesmo operador), para corrigir o problema, o instalador propôs efetuar dois tipos de reparações, dependendo se o problema interessava apenas uma parte ou a totalidade da soldadura. No caso de o problema interessar apenas parte da soldadura, a reparação consistia na colocação de um remendo sobre essa parte da soldadura. Se o problema interessasse toda a soldadura, a reparação era realizada através de uma faixa de sobreposição, com 0,2 m de largura, colocada sobre a totalidade

Quadro 4 – Critérios de aceitação/rejeição em termos de estanquidade para as soldaduras de geomembrana de PVC na Barragem do Pico da Urze.

Ensaio	Norma	Condições de ensaio	Condições de aceitação
Pressão de ar (soldadura dupla)	ASTM D7177	<ul style="list-style-type: none"> – pressão de ensaio: 2 bar – tempo de ensaio: 5 min. – soldadura integralmente pressurizada 	<ul style="list-style-type: none"> – pressão final admissível: 1,8 bar – saída do ar pela extremidade da soldadura, no lado oposto àquele em que se inseriu a agulha, após a remoção da selagem
Haste metálica (soldaduras simples)	ASTM D4437	<ul style="list-style-type: none"> – passagem da haste metálica ao longo da totalidade da soldadura 	<ul style="list-style-type: none"> – soldadura contínua – ausência de “bocas de peixe” – penetração da haste metálica na soldadura inadmissível

Quadro 5 – Critérios de aceitação/rejeição em termos de estanquidade para as soldaduras de geomembrana de PEAD na Barragem da Portela.

Ensaio	Norma	Condições de ensaio	Condições de aceitação
Pressão de ar (soldaduras duplas)	ASTM D5820	<ul style="list-style-type: none"> – pressão de ensaio: 2-3 bar – tempo de ensaio: 5 min. – soldadura integralmente pressurizada 	<ul style="list-style-type: none"> – pressão final admissível: 10% da pressão inicial – saída do ar pela extremidade da soldadura, no lado oposto àquele em que se inseriu a agulha, após a remoção da selagem/realização de furo na extremidade da soldadura
Elétrico (soldaduras simples)	ASTM D6365	<ul style="list-style-type: none"> – passagem da sonda elétrica sobre a totalidade da soldadura 	<ul style="list-style-type: none"> – soldadura contínua – emissão de um som agudo e/ou de uma fâsca: inadmissível

da soldadura. Esta última medida não chegou a ser aplicada na totalidade das soldaduras por não haver geomembrana (faixa) aprovacionada para efetuar as faixas de sobreposição em tempo útil.

Relativamente às soldaduras cujas resistências ao corte apresentaram resultados insatisfatórios, procedeu-se à comparação das resistências ao corte obtidas nos ensaios com os valores das tensões de corte de cálculo induzidas pela sucção, calculadas considerando as ações do vento (para velocidades de 90 e de 150 km/h). Verificou-se que as primeiras eram superiores, pelo que as soldaduras não foram reparadas ou substituídas.

Na BPU, os ensaios de arranque e de corte sobre as soldaduras duplas foram realizados com uma frequência de 1/300 m de soldadura, segundo o especificado no projeto. Esta frequência de ensaios foi estabelecida com base na maior experiência dos operadores na realização deste tipo de soldaduras em geomembranas de PEAD.

Na BP, foram colhidas 10 amostras. Destas, 4 apresentaram valores de resistência ao corte inferiores aos mínimos definidos nos critérios de aceitação/rejeição. De acordo com definido no Planos de garantia de qualidade de instalação dos geossintéticos desta barragem, se os resultados dos ensaios destrutivos não satisfizessem os critérios de aceitação/rejeição, o instalador podia optar por fazer a soldadura entre os locais de amostras cujos resultados foram satisfatórios, ou refazer ensaios de autocontrolo em amostras retiradas a uma distância mínima de 3 m, para cada lado do local da amostragem cujos resultados não cumpriram os critérios de aceitação/rejeição. Caso as

segundas amostras apresentassem resultados conformes, deveria a soldadura ser rejeitada no interior da zona limitada por aquelas amostras. Se, pelo contrário, os resultados não fossem satisfatórios seria repetido o mesmo procedimento.

No que diz respeito às amostras cujos resultados foram insatisfatórios, foram retiradas novas amostras para ensaio a uma distância de 3 m, para cada lado do local da amostragem. Os resultados obtidos para essas amostras continuaram a não cumprir os critérios de aceitação/rejeição definidos. O instalador optou por substituir todas as soldaduras cujos resultados foram insatisfatórios.

5.4.4 – Ensaio não destrutivo (pressão de ar, haste metálica e método elétrico)

Os ensaios não destrutivos foram realizados em todas as soldaduras, conforme anteriormente mencionado. No caso da BPU, nos locais em que os ensaios de pressão de ar (soldaduras duplas) e de haste metálica (soldaduras simples), apresentaram resultados insatisfatórios, procedeu-se à reparação das soldaduras, geralmente, mediante a colocação de um remendo. As soldaduras reparadas foram reensaiadas, assim como as soldaduras resultantes da colocação dos remendos. Os resultados finais cumpriram os critérios de aceitação/rejeição estabelecidos na totalidade das soldaduras.

Procedimento semelhante foi adotado na BP, quando os resultados dos ensaios de pressão de ar, realizados nas soldaduras duplas por termofusão, e dos ensaios elétricos (*spark test*), efetuados nas soldaduras de extrusão (remendos), não cumpriram os critérios de aceitação/rejeição definidos, as soldaduras foram reparadas e reensaiadas, tendo os resultados finais sido satisfatórios para todas as soldaduras.

6 – CONCLUSÕES

Neste artigo, foram descritas as características gerais das barragens do Pico da Urze e da Portela e suas albufeiras. Foram, também, apresentados os principais desafios enfrentados durante o projeto e/ou a construção dos sistemas de impermeabilização dessas obras, incluindo o dimensionamento e construção do sistema de ancoragens dos geossintéticos, a definição dos requisitos e a preparação da camada de apoio dos geossintéticos e a implementação de procedimentos de garantia de qualidade de instalação desses materiais. Apesar de se localizarem na mesma Região e em cenários geológicos semelhantes, apresentam características muito diferenciadas devido às condições locais prevalentes, pelo que foram adotados sistemas muito diferentes em termos do tipo de geossintéticos e de sistemas de ancoragem.

A utilização de geossintéticos em sistemas de impermeabilização é uma solução aplicável a diversos tipos de obras, para além das barragens e suas albufeiras, como, por exemplo, túneis ou aterros de resíduos. Independentemente do tipo de material e da matéria-prima que o constitui, é importante selecionar o(s) geossintético(s) que melhor atenda(m) às necessidades específicas de cada obra. A conceção geral da obra, o dimensionamento dos geossintéticos e a especificação dos seus requisitos de desempenho, e a qualidade da sua instalação são fatores determinantes para garantir as condições de segurança, de funcionalidade e de durabilidade do sistema de impermeabilização.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D 4437-18 (2018). *Standard practice for nondestructive testing (NDT) for determining the integrity of seams used in joining flexible polymeric sheet geomembranes*. American Society for Testing Materials, USA.

ASTM D 5820-18 (2018). *Standard practice for pressurized air channel evaluation of dual seamed geomembranes*. American Society for Testing Materials, USA.

- ASTM D 6365-18 (2018). *Standard practice for nondestructive testing of geomembrane seams using the spark test*. American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM D 6392-18 (2018). *Standard test method for determining the integrity of nonreinforced geomembrane seams produced using thermo-fusion methods*. American Society for Testing Materials, USA.
- ASTM D 7177 -15 (2015). *Standard specification for air channel evaluation of polyvinyl chloride (PVC) dual track seamed geomembranes*. American Society for Testing Materials, USA.
- CARPI (2018). *Pico da Urze reservoir. Wind uplift and stability calculation*. Technical note.
- CARPI (2019). *Waterproofing of Pico da Urze reservoir with CARPI geomembrane system*. Design Statement (revision 3).
- Giroud, J.P. (1995). *Uplift of geomembranes by wind*. Geosynthetics International, Vol. 2, No. 6, pp. 897-952. <https://doi.org/10.1680/gein.2.0042>
- ICOLD (2010). *Geomembrane sealing systems for dams*. Bulletin 135 of the International Commission on Large Dams, Paris, France.
- TPF (2019). *Ampliação do Aproveitamento Hidroelétrico da Calheta. Barragem do Pico da Urze*.
- Vertematti, J. C. (2004). *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. 6 ed. São Paulo: Edgard Blucher.

A GEOTECNIA NA TRANSIÇÃO ECO-DIGITAL DAS INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE

Geotechnics in the eco-digital transition of transport infrastructures

José Neves^a, João Moutinho^b, Ana Cristina Freire^c, André Paixão^c, Bernardo Monteiro^d, Manuel Parente^b, Nuno Cristelo^e, António Gomes Correia^f

^a CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal.

^b BUILT CoLAB, Portugal

^c Departamento de Transportes, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal; CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal

^d Infraestruturas de Portugal S.A., Portugal

^e Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal

^f IRISE, ARISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal.

RESUMO – O artigo apresenta uma compilação de exemplos nacionais de investigação, desenvolvimento e inovação relacionados com a transição verde e a transformação digital no âmbito da geotecnia nos transportes e associados às terraplenagens, pavimentos e vias-férreas. No âmbito da transição verde, são apresentados exemplos de aplicação de materiais não convencionais e renováveis e de técnicas de estabilização baseadas na ativação alcalina de excedentes industriais. Em relação à transformação digital, são descritos desenvolvimentos com aplicação às terraplenagens, aos pavimentos rodoviários e à via-férrea (morfologia das partículas de agregado de balastro). Os exemplos apresentados no artigo demonstram a capacidade geotécnica que as empresas e as instituições do sistema científico e tecnológico em Portugal têm para o cumprimento das metas estabelecidas para a sustentabilidade e resiliência no setor das infraestruturas de transporte.

ABSTRACT – The paper presents a collection of national examples of research, development and innovation related to the green transition and digital transformation in transportation geotechnics and related to earthworks, pavements, and railways. In the scope of the green transition, examples of the application of non-conventional and renewable materials and stabilization techniques based on the alkaline activation of industrial by-products are presented. Concerning digital transformation, developments with application to earthworks, road pavements and railways (morphology of ballast aggregate particles) are described. Those examples demonstrate the geotechnical capability and allow companies and institutions of the scientific and technological system in Portugal to fulfil the goals established for sustainability and resilience in the sector of transport infrastructures.

Palavras Chave – Geotecnia, infraestruturas de transporte, transformação digital, transição verde.

Keywords – Geotechnic, transport infrastructures, digital transformation, green transition.

E-mails: jose.manuel.neves@tecnico.ulisboa.pt (J. Neves), joao.moutinho@builtcolab.pt (J. Moutinho), acfreire@lnec.pt (A. Freire), apaixao@lnec.pt (A. Paixão), bernardo.monteiro@infraestruturasdeportugal.pt (B. Monteiro), manuel.parente@builtcolab.pt (M. Parente), ncristel@utad.pt (N. Cristelo), agc@uminho.pt (A. Gomes Correia)

ORCID: orcid.org/0000-0002-7131-7967 (J. Neves), orcid.org/0000-0003-1955-0750 (J. Moutinho), orcid.org/0000-0002-7940-2648 (A. Freire), orcid.org/0000-0002-1665-7037 (A. Paixão), orcid.org/0000-0001-5765-2622 (M. Parente), orcid.org/0000-0002-3600-1094 (N. Cristelo), orcid.org/0000-0002-0103-2579 (A. Gomes Correia)

1 – INTRODUÇÃO

A construção de qualquer infraestrutura de transporte e as necessárias intervenções de conservação ou reabilitação ao longo do seu ciclo de vida têm um enorme impacto do ponto de vista económico e ambiental. Esse impacto, como por exemplo o consumo de recursos naturais não renováveis que caracterizam a maioria das técnicas construtivas tradicionais, não é mais sustentável. O setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), na sua relação com o ambiente natural e construído desde as fases iniciais de planeamento e projeto até às fases de exploração e conservação, encontra-se em transição eco-digital para um modelo de economia circular de acordo com os princípios da sustentabilidade e ao longo do ciclo de vida das obras (Gomes Correia et al., 2022; Hossain et al., 2020; Pomponi e Moncaster, 2017).

Em 2015 foi apresentada pelas Nações Unidas (ONU) a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, adotada por todos os Estados-Membros. Esta agenda estabelece as prioridades do desenvolvimento sustentável global para 2030 em torno de um conjunto de objetivos e metas comuns, nomeadamente erradicar a pobreza, erradicar a fome, assegurar água potável e saneamento, proteger a vida marinha e a vida terrestre, entre outros. Assim, foram definidos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas associadas, organizados em 5 princípios enquadramentos (5P – Pessoas, Planeta, Prosperidade, Paz e Parcerias), a integrar nas políticas, processos e ações desenvolvidas a nível nacional, regional e global (UN, 2023; Cabaço et al., 2017). O progresso dos países ao nível dos ODS tem vindo a ser monitorizado pela ONU e é expresso através do SDG Index & Monitoring. Observou-se que, entre 2015 e 2019, o progresso mundial na concretização dos 17 ODS foi de apenas 0,5% ao ano. Em 2020 e 2021 não se registaram progressos devido ao desempenho negativo dos países em desenvolvimento (Sachs et al., 2022).

A Comissão Europeia (CE) apresentou também um programa político com o objetivo de alcançar a sustentabilidade na União Europeia (EU) e fora dela. Os ODS são uma parte intrínseca das diretrizes políticas e estão no centro da formulação de políticas de ação interna e externa em todos os setores. (Cabaço et al., 2017), de modo a construir uma Europa mais verde, mais digital e mais resiliente. A CE no seu Pacto Ecológico Europeu pretende ser o primeiro continente com impacto neutro no clima até 2050, apresentar a redução de, pelo menos, 55 % das emissões de gases com efeito de estufa em comparação com os níveis de 1990 e plantar 3 mil milhões de árvores na União Europeia até 2030 (CE, 2023). Dada a necessidade de uma resposta de âmbito alargado, foi criado o Mecanismo de Recuperação e Resiliência de modo a impulsionar a UE a atingir o seu objetivo de neutralidade climática até 2050, posicionar a Europa numa via de transição digital, e tornar as economias e sociedades europeias mais sustentáveis, resilientes e preparadas para enfrentarem os desafios e aproveitarem de forma mais eficiente as oportunidades resultantes da transição ecológica e transformação digital (CE, 2023).

Portugal tem apresentado um elevado envolvimento na elaboração e na consequente implementação da Agenda 2030. Em 2017, foi reforçado o compromisso com a apresentação de um relatório nacional sobre a implementação da Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável, o qual apresentava as ações levadas a cabo a nível nacional relativamente a cada um dos ODS (Cabaço et al., 2017). Mais recentemente, foi elaborado e encontra-se em implementação o Plano de Recuperação e Resiliência (PRR). Este é um programa de âmbito nacional, com um período de execução previsto até 2026. Com o PRR pretende-se implementar um conjunto de reformas e de investimentos destinados a impulsionar o país na senda da retoma, do crescimento económico sustentado e da convergência com a Europa ao longo da próxima década, tendo como orientação um conceito de sustentabilidade inspirado nos ODS. O PRR está alinhado assim com os seis pilares relevantes da estratégia europeia 2030, nomeadamente a transição verde, a transformação digital e o crescimento inteligente, sustentável e inclusivo (PRR, 2023). O setor das infraestruturas de transportes é um dos exemplos da implementação do PRR, como o demonstram as muitas obras em curso associadas, principalmente, ao aumento de capacidade e reforço de acessibilidades das redes ferroviária e rodoviária, bem como de portos marítimos e plataformas logísticas.

A geotecnia sempre tem estado presente nas obras de infraestruturas de transportes e tem demonstrado que pode contribuir ativamente para o cumprimento dos objetivos da sustentabilidade, transição verde, transformação digital, e transição climática (Gomes Correia et al., 2016). Com efeito, podem ser múltiplas as possibilidades de atuação em linha com estes objetivos, como por exemplo, a utilização de materiais não convencionais, a inovação em técnicas de estabilização e a implementação de sistemas de otimização e de apoio à decisão nas várias fases do ciclo de vida das obras (e.g., *Digital Twins, Big Data, Machine Learning, Building Information Modelling*) (Gomes Correia et al., 2022).

O artigo apresenta uma compilação de exemplos nacionais de investigação, desenvolvimento e inovação relacionados com a transição verde e a transformação digital no âmbito da geotecnia nos transportes e associados predominantemente às terraplenagens, estruturas geotécnicas, pavimentos rodoviários e vias-férreas. Os exemplos que são apresentados pretendem demonstrar e promover a capacidade instalada em Portugal de empresas e instituições do sistema científico e tecnológico contribuírem em grande medida para o cumprimento das metas estabelecidas ao nível dos ODS e do PRR. No âmbito da transição verde, o artigo descreve exemplos de aplicação de materiais não convencionais e renováveis e de técnicas de estabilização baseadas na ativação alcalina de excedentes industriais. Em relação à inovação na transformação digital, são apresentados vários desenvolvimentos inovadores com aplicação às terraplenagens, aos pavimentos rodoviários e à via-férrea (morfologia das partículas de agregado de balastro).

O artigo foi desenvolvido no âmbito das atividades da Comissão Portuguesa de Geotecnia nos Transportes, da Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG), e teve como suporte a apresentação oral na sessão intitulada “Uma alavanca para a transição eco-digital nas infraestruturas de transporte” do seminário evocativo dos cinquenta anos da SPG e integrado no programa de comemorações dos setenta e cinco anos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), que foi realizado em 2022 no LNEC, em Lisboa.

2 – DESENVOLVIMENTOS NO ÂMBITO DA TRANSIÇÃO VERDE

2.1 – Utilização de materiais não convencionais e renováveis

2.1.1 – Valorização e processamento de resíduos

São significativas e também crescentes as quantidades de resíduos produzidos a nível nacional e mundial, decorrentes das atividades de construção e que constituem um problema, com visíveis impactos económicos, sociais e ambientais. A deposição continuada dos resíduos produzidos, em especial nas atividades relacionadas com a engenharia civil, em aterros não controlados, traduz-se em elevados impactos ambientais, contribuindo para uma diminuição dos recursos finitos e não renováveis do nosso planeta. A consciencialização da necessidade de reutilizar e de reciclar estes materiais, reduzindo o volume a conduzir a aterro e até mesmo com o objetivo final de eliminar completamente a sua deposição em aterro, conduz à necessidade de adotar uma adequada gestão de resíduos com a aplicação de ações que promovam a efetiva redução das quantidades produzidas. Uma adequada conceção, baseada nos princípios do *Ecodesign* e do modelo *Cradle to Cradle* (“do berço ao berço”) permitirá promover, a reutilização, recuperação ou reciclagem dos materiais aplicados, durante as futuras operações de conservação e/ou reabilitação, tendo presente o conceito de ciclo de vida das infraestruturas e dos materiais aplicado à Economia Circular.

A utilização de materiais não convencionais e renováveis em infraestruturas de transportes e em obras geotécnicas, em alternativa aos materiais naturais de existência finita, nas atividades relacionadas com a engenharia civil constitui-se como a alternativa económica e ambientalmente viável a adotar. Os agregados reciclados provenientes de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), nomeadamente betão britado, betão misto ou Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR, ou RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*, na terminologia inglesa) apresentam-se como alternativa aos

agregados naturais. Pode ainda referir-se os agregados artificiais, nomeadamente as escórias de aciaria e as escórias de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Sendo que todos estes agregados devem cumprir com as exigências de qualidade e durabilidade adequadas às aplicações previstas, nomeadamente em infraestruturas de transportes e em obras geotécnicas.

A indústria europeia de agregados constitui a maior parte do setor extrativo não energético na União Europeia, com 3 bilhões de toneladas produzidas anualmente: 46,6% de agregado natural britado; 38,7% de areia e seixo; 10,6% de agregados reutilizados e reciclados; 2% de agregados marinhos; e 2% de agregados artificiais (UEPG, 2022). Em Portugal, a produção média anual de agregados, estimada em 2019, é de 41 milhões de toneladas (UEPG, 2022), consumidos sobretudo nas atividades de construção, conservação e reabilitação. Nas últimas décadas, as infraestruturas de transportes têm sido um importante consumidor destes materiais. Portugal tem fontes significativas de agregados naturais (e.g., basalto, granito e calcário), no entanto, o seu transporte para zonas urbanas, onde o seu consumo é maior, é uma condição que afeta os seus custos.

No que se refere à produção de RCD, estima-se que em Portugal a produção anual seja de cerca de $11,40 \times 10^6$ ton, com uma taxa de recuperação de 74%, sendo assim fundamental que estes sejam reciclados ou reutilizados em obras de engenharia civil, nomeadamente infraestruturas de transportes (Reis et al., 2021). Em Portugal têm sido realizados diversos estudos, com a aplicação de agregados reciclados de RCD em infraestrutura de transportes, com apresentação de metodologias, características e avaliação de desempenho, que evidenciam o potencial de aplicação daquele tipo de agregados.

No caso particular das MBR, estas são produzidas anualmente em quantidades muito significativas em Portugal e também em todo o mundo, como resultado de operações de conservação e reabilitação de pavimentos com camadas betuminosas. Como principal característica das MBR refere-se o facto de poderem ser 100% reutilizadas sem que ocorra a redução das suas propriedades e das suas funções (Antunes et al. 2021). A sua incorporação conduz a evidentes benefícios económicos, sociais e ambientais, com impactos diretos na redução da procura de matérias-primas - agregados e betume -, e dos custos e impactos associados ao fabrico, transporte e aplicação de novas misturas betuminosas, nomeadamente através da redução da emissão dos gases com efeito de estufa. A incorporação de MBR em novas misturas betuminosas pode conduzir a uma redução até cerca de 70% dos custos (Antunes et al. 2019). Complementarmente refere-se a capacidade de multi-reciclagem que as MBR apresentam, com a possibilidade de reutilizações sucessivas, durante a vida útil do pavimento, sem redução das suas funções (Antunes et al. 2021).

Na Figura 1 são apresentadas as percentagens de MBR reutilizadas ou recicladas em diversos países europeus e nos EUA. A operação identificada como reutilização corresponde ao uso da MBR sem redução das suas propriedades e funções e a reciclagem corresponde à sua aplicação em camadas de fundação ou aterro ou outras em que se verifica uma diminuição das suas funções (EAPA, 2023). Observa-se existirem países com elevada taxa de reutilização e de reciclagem, a que corresponde uma reduzida deposição em aterro. Contudo existem ainda países com valores elevados de MBR depositados em aterro, ou outros para os quais não existem dados disponíveis.

Em Portugal, as especificações técnicas existentes permitem a incorporação de MBR, com diferentes percentagens em função da camada onde são aplicadas. Assim, são definidos vários requisitos técnicos, nomeadamente a avaliação da presença de matéria estranha (deve ser inferior a 1% para a camada de desgaste e inferior a 5% para as restantes camadas e a presença de madeira, plástico ou materiais sintéticos deve ser inferior a 0,1%); as propriedades do ligante existente na MBR devem ser avaliadas; a quantidade máxima de MBR é definida em função das propriedades e eventuais modificações do ligante, do tipo de camada e da presença de matéria estranha; o teor em água máximo é de 5% e a dimensão máxima das partículas é de 32 mm (Antunes et al. 2019).

Nas secções seguintes são apresentados diversos exemplos nacionais de utilização de materiais não convencionais e renováveis em infraestruturas de transportes, onde se incluem predominantemente os agregados reciclados.

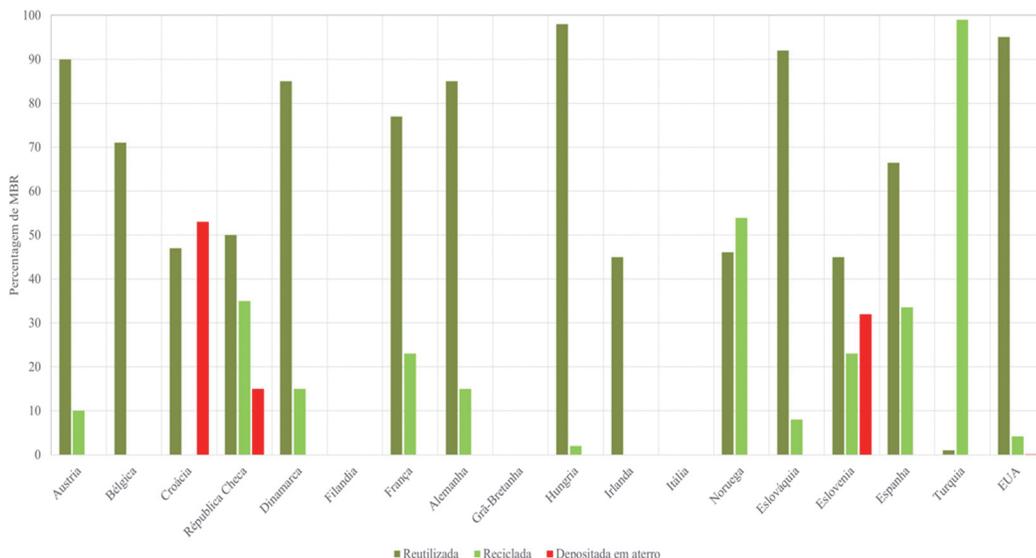


Fig. 1 – Quantidades de MBR produzidas e aplicadas (adaptado de EAPA, 2023).

2.1.2 – Aplicações em infraestruturas de transportes

Como agregados não convencionais e renováveis referem-se, entre outros, os agregados reciclados obtidos a partir de betão britado e de betão britado misto que constituem uma significativa fonte de materiais decorrentes das atividades de construção civil. Por outro lado, a maioria dos pavimentos rodoviários existentes a nível mundial são constituídos por camadas betuminosas, sendo que as MBR resultantes de processos de fresagem ou de britagem são um material reciclado passível de ser aplicado em operações de conservação e reabilitação de pavimentos, nomeadamente em camadas granulares não ligadas e no também fabrico de novas misturas betuminosas, a frio “in situ” ou a quente em central. Complementarmente têm sido realizados vários estudos para avaliação da viabilidade de incorporação de diversos tipos de resíduos em infraestrutura de transportes. Referem-se o vidro britado, borracha de pneus, escórias de aciaria, balastro reciclado e plástico reciclado, entre outros (ARRB, 2022).

Nas últimas décadas, têm vindo a ser desenvolvidos diversos estudos e projetos de investigação e inovação com vista à identificação, caracterização e validação de características, métodos de avaliação e de tecnologias de aplicação de agregados reciclados em camadas não ligadas. Referem-se os projetos ALT-MAT (*ALternative MATerials in road construction project*) e SAMARIS (*Sustainable and Advanced MATerials for Road InfraStructure*) (European Commission, 2001a; SAMARIS, 2004). Destaca-se ainda o projeto DIRECT_MAT (*DISmantling and RECycling Techniques for road MATerials – Sharing knowledge and practices*) cujos principais objetivos foram partilhar e disseminar, à escala europeia, o conhecimento nacional dos vários países envolvidos e as práticas verificadas “in situ” sobre a demolição e reciclagem de pavimentos e de materiais relacionados com pavimentos de modo a incentivar e melhorar as práticas de reciclagem para a construção e a conservação de infraestruturas rodoviárias (European Commission, 2011b). Com o projeto RE-ROAD (*End of Life Strategies of Asphalt Pavments*) pretendeu-se desenvolver os conhecimentos e as tecnologias inovadoras existentes e identificadas para estratégias de fim de vida de infraestruturas betuminosas rodoviárias. Estas estratégias apresentam um significativo impacto na eficiência energética e na pegada ambiental do sistema de transportes europeu, enquadrada na lógica do ciclo de vida das infraestruturas (Kalman et al., 2013).

A nível nacional é de referir o projeto SUPREMA – *Aplicação Sustentável de Reciclados de Construção e Demolição Materiais em Infraestruturas Rodoviárias* – que foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de 2010 a 2014, em cooperação com o Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa. O projeto teve como objetivo principal promover a aplicação sustentável e resiliente de RCD nas camadas de base, sub-base e leito de pavimento em estradas, dando assim resposta às questões levantadas pela comunidade técnica nacional e internacional sobre a sua reciclagem (Freire et al., 2019).

Este projeto incluiu um programa experimental extenso e detalhado, com a avaliação das características geoambientais e geomecânicas de diferentes tipos de RCD selecionados, considerando: a origem, metodologia de triagem e composição final; a comparação do comportamento de camadas granulares não ligadas com ou sem agregados reciclados; a determinação dos parâmetros a usar no dimensionamento de pavimentos, considerando a aplicação de RCD e avaliação das metodologias construtivas a aplicar, função do tipo de RCD, para camadas não ligadas de base e de sub-base e de leito de pavimento. Foi construído um trecho experimental à escala real, que foi instrumentado com extensómetros e células de carga, tendo em vista obter informações sobre as extensões e tensões registadas no interior das camadas construídas com os RCD durante a realização de ensaios de carga com defletómetro de impacto (FWD). Os ensaios de FWD foram realizados durante e após a construção do trecho experimental, permitindo efetuar a avaliação do comportamento mecânico das camadas constituídas por RCD. A análise global do comportamento do pavimento do trecho experimental, a par da leitura da instrumentação aplicada, permitiu obter módulos de deformabilidade das camadas constituintes e a consequente validação da capacidade de carga dos materiais reciclados aplicados. A Figura 2 apresenta os módulos de deformabilidade da camada granular, obtidos por *back analysis* para cada secção (T1 a T4) do trecho experimental, a partir dos resultados dos ensaios de FWD efetuados no início do outono (setembro de 2012) e no início da primavera (abril de 2013). Os resultados evidenciam que os agregados reciclados, apesar de apresentarem um comportamento diferente dos materiais naturais, tiveram, no entanto, um comportamento mecânico adequado (Freire et al. 2019; Neves et al. 2023).

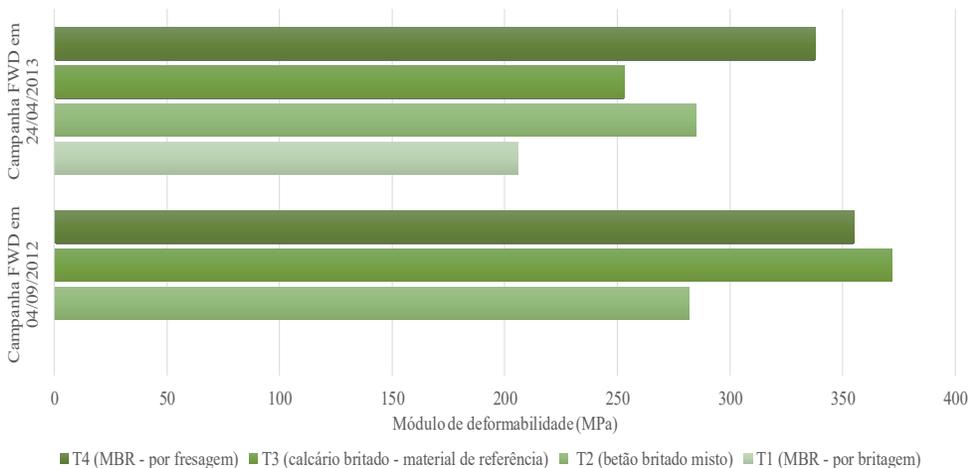


Fig. 2 – Módulos de deformabilidade de materiais aplicados em camada de base granular.

No que respeita à reciclagem de MBR, a aplicação em camadas ligadas ou não ligadas de pavimentos rodoviários é já comum ser adotada em vários países. Destacam-se em particular os países onde os agregados naturais de qualidade são escassos ou mesmo inexistentes, que têm promovido o incremento da percentagem de incorporação de MBR até 100%, conduzindo a uma

efetiva redução dos custos associados às atividades de construção, conservação e reabilitação de estradas. A multi-reciclagem de MBR, com o uso de materiais não tradicionais e renováveis, é um passo ainda maior na direção da economia circular de materiais com a reutilização das MBR ao longo da vida das infraestruturas rodoviárias, em vários ciclos, sem que seja diminuída a sua funcionalidade e sem perda de valor (Antunes et al., 2019).

Mais recentemente foi desenvolvido um extenso estudo laboratorial que pretendeu avaliar a capacidade de multi-reciclagem de MBR considerando elevadas taxas de incorporação (75%) em camadas de desgaste de pavimentos rodoviários. Para estudar o desempenho ao longo do ciclo de vida, foram avaliadas misturas betuminosas com e sem envelhecimento, através da aplicação de um processo de envelhecimento acelerado em laboratório. Em seguida, as misturas betuminosas foram avaliadas em termos do seu desempenho mecânico. O estudo realizado compreendeu dois ciclos de reciclagem das MRB tendo permitido concluir que as misturas betuminosas apresentaram, em geral, um desempenho melhor do que as misturas betuminosas produzidas apenas com a incorporação de materiais virgens. Foi também possível concluir que o fracionamento das MBR e a caracterização do betume proveniente das MBR são procedimentos chave para garantir a homogeneidade final das novas misturas betuminosas produzidas com a incorporação de MBR, sobretudo nos casos de elevadas taxas de incorporação. A utilização de um rejuvenescedor de base vegetal permitiu recuperar com sucesso as propriedades do betume envelhecido nas MBR. Foi assim possível demonstrar a capacidade de multi-reciclagem das misturas betuminosas com elevadas taxas de incorporação de MBR, com a validação do seu desempenho adequado a curto e longo prazo para aplicação em camadas de desgaste de pavimentos rodoviários (Antunes et al. 2021).

De 2005 a 2008 decorreu o projeto intitulado “Aplicação de resíduos em infraestruturas de transportes e obras geotécnicas – Valorização de escórias de aciaria” que pretendeu promover a valorização das escórias produzidas nos fornos elétricos de arco da Siderurgia Nacional como agregado siderúrgico inerte para a construção (ASIC) através da sua utilização como material de construção de infraestruturas de transporte e obras geotécnicas (Gomes Correia et al., 2009 e 2012).

O projeto ADVAMCE – Desenvolvimento de técnicas de valorização de materiais reciclados para promoção da economia circular nas infraestruturas de transporte – foi desenvolvido de 2018 a 2022 em cooperação com o Brasil. Neste projeto foi investigada a utilização de 100% de betão britado reciclado em misturas tratadas com baixas dosagens de cimento e reforçadas com fibra de coco para camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários (Crucho et al., 2022).

Em 2022 foi iniciado o projeto be-READY (*Resilient Road Pavements for Sustainability*) sobre técnicas de reciclagem de camadas ligadas em pavimentos rodoviários, em cooperação com a Noruega. O projeto tem o objetivo de desenvolver uma metodologia de cálculo para estimar o custo real de misturas betuminosas, incorporando também materiais não convencionais, considerando as emissões de gases com efeito de estufa avaliadas no ciclo de vida das obras.

2.1.3 – Legislação e documentos normativos

São vários os documentos técnicos e legislativos de suporte internacionais e nacionais para a utilização de materiais não convencionais e renováveis em engenharia civil e, nomeadamente, em infraestruturas de transportes. Refere-se o Regime Geral de Gestão de Resíduos (Decreto-Lei nº102/2020), a Lista Europeia de Resíduos (LER) e as especificações LNEC, enquanto guias para a utilização de agregados reciclados em betão, misturas betuminosas a quente em central, camadas granulares não ligadas, caminhos rurais e florestais e ainda no preenchimento de valas.

Para promover a valorização e a incorporação de RCD em obra e após operação de tratamento, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), enquanto entidade responsável pela implementação das políticas de ambiente em Portugal, apresenta diversos documentos (Regras Gerais) relativos a fresagem e britagem de RCD, resíduos de balastro da via-férrea, e incorporação de resíduos de betão e de RCD mistos.

No âmbito do projeto SUPREMA foi desenvolvido um catálogo de pavimentos destinado à aplicação de RCD em estradas e arruamentos de baixo tráfego. As estruturas tipo do catálogo são caracterizadas por camadas não ligadas de base e de sub-base constituídas por agregado reciclado de resíduos mistos, provenientes da britagem de alvenaria e de betão, ou por agregado reciclado resultante da mistura de resíduos, provenientes de MBR (30%), com agregado natural britado de granulometria extensa (70%) (Neves et al., 2016).

2.2 – Técnicas de estabilização baseadas na ativação alcalina de excedentes industriais

2.2.1 – Produção de cimentos alcalinos

A transição verde no âmbito da geotecnia, tal como no âmbito de toda a atividade da indústria da construção, assenta sobretudo em dois fatores fundamentais, tendo em conta as especificidades desta atividade que requer grandes volumes de matérias-primas mas, ao mesmo tempo, permite que estas possam ser provenientes de outras atividades industriais:

- A possibilidade de aplicar (reciclar) grandes volumes de materiais granulares, de natureza mineral, excedentários das indústrias mineira, metalúrgica, da queima de carvão em centrais termelétricas, da própria construção, entre outros que, para já, podem não ser tão representativos, mas possuem elevado potencial (Provis e van Deventer, 2014).
- O elevado consumo do cimento Portland, cuja produção mundial constitui o terceiro maior responsável pela emissão de CO₂-eq, apenas atrás dos Estados Unidos e da China (Pourakbar e Huat, 2017). O desenvolvimento de um ligante com menor pegada ecológica, capaz de substituir o cimento Portland, constituiria um avanço tecnológico com elevada repercussão nas preocupações ambientais que crescem, inexoravelmente, há décadas.

Ora, a geotecnia constitui uma das áreas em que estes dois grandes pilares contributivos da indústria da construção para uma maior sustentabilidade ambiental são mais expressivos, tendo em conta as necessidades elevadas de matéria-prima envolvida em diversos tipos de obra geotécnica, que englobam sobretudo materiais granulares, mas também, embora numa dimensão inferior, os ligantes utilizados na estabilização de solos ou de resíduos industriais a utilizar como material granular, na substituição de solos naturais.

O conhecimento e interesse nos designados “cimentos alcalinos”, nomeadamente para substituição do tradicional cimento Portland, em muitas das aplicações em que este é considerado como sendo a solução mais comum e eficaz, está a aumentar há sensivelmente duas décadas. Este tipo de cimento é baseado em excedentes industriais, que são “ativados” por aditivos fortemente alcalinos, e podem constituir vantagens ao nível da sustentabilidade, mas também do ponto de vista económico e, sobretudo, técnico. Contudo, o conhecimento sobre o comportamento constitutivo dos solos estabilizados com este tipo de ligantes é ainda escasso (Correa-Silva et al., 2021), estando o esforço da investigação específica centrado ainda no desenvolvimento de cimentos otimizados para cada tipo de solo (nomeadamente ao nível da reologia), por um lado, e nas condições de aplicação, por outro. São agora necessários estudos laboratoriais e trabalhos de campo destinados à avaliação da durabilidade e sustentabilidade ambiental e da recolha de informação que permita desenvolver a modelação constitutiva das misturas solo – cimento alcalino.

A presente secção pretende descrever resumidamente o atual panorama da utilização de excedentes industriais na estabilização de solos, com uma forte componente associada aos referidos cimentos alcalinos, tendo em conta que constituem, dada a sua versatilidade, robustez e adaptabilidade, uma solução muito promissora, capaz de substituir o cimento Portland nas aplicações atuais em geotecnia e, mais relevante, capaz de tornar viável a utilização de excedentes industriais cuja aplicação, hoje em dia, não é adequada, dado o potencial de contaminação que representam. São apresentados também alguns trabalhos relacionados com o estudo do comportamento constitutivo de solos estabilizados com cimentos alcalinos, bem como um caso de obra relacionado com a estabilização de um pavimento rodoviário.

Uma muito significativa parte da abundante literatura científica disponível sobre o uso de cimentos alcalinos (AAC – *alkali activated cements*, na terminologia inglesa) como alternativa ao cimento Portland (OPC) considera a falta de recursos materiais, designados por “precursores” como o grande obstáculo à produção, à escala industrial, destes cimentos. Embora um número substancial de trabalhos científicos mostre claramente que as matérias-primas (precursores) necessárias para a fabricação de AAC existem em abundância em qualquer parte do mundo, é também verdade que a adequabilidade destes recursos não é constante, uma vez que alguns países possuem uma clara abundância de precursores muito eficazes (e.g., escória de alto-forno), enquanto outros países possuem uma abundância de excedentes industriais muito menos eficazes ou, pelo menos, mais exigentes do ponto de vista da sua preparação para utilização no fabrico de AAC.

Portugal constitui um exemplo claro dos países cujos tipos de excedentes industriais só começaram a ser estudados em AAC mais recentemente, quando se tornou evidente o potencial desta tecnologia e, ao mesmo tempo, se tornou evidente o interesse em diversificar as respetivas fontes de matéria-prima, de modo a permitir a utilização de AAC em qualquer região ou país do globo e, mais importante ainda, de modo a permitir incorporar praticamente qualquer tipo de resíduo ou subproduto. Este último aspeto é muito relevante, tendo em conta que cada país produz, de forma preferencial, diferentes tipos de excedentes industriais – por exemplo, a biomassa poderá ser a principal preocupação em alguns países, enquanto, noutras geografias, as escórias de aciaria poderão constituir o maior interesse, a nível de escoamento, sendo ambos igualmente incorporáveis em AAC, desde que previamente tratados de forma adequada. O cenário português tornou-se, recentemente, e no que respeita à utilização de AAC, ainda mais dependente da otimização dos excedentes industriais autóctones, aquando do fecho da central termoelétrica do Pego, que, nas primeiras duas décadas de disseminação desta tecnologia, forneceu cinzas volantes para grande parte dos trabalhos de investigação realizados neste país.

A outra grande vertente, e talvez principal condicionante no que respeita às questões ambientais que envolvem a utilização de AAC, está relacionada com os chamados “ativadores”. Na esmagadora maioria dos trabalhos desenvolvidos, a nível mundial, foram utilizados reagentes comerciais, nomeadamente uma solução à base de hidróxido de sódio e/ou silicato de sódio. Contudo, os potenciais ativadores não se limitam a estes dois reagentes. Várias outras possibilidades estão já disponíveis, ou em avançado estado de desenvolvimento, a maioria com claras vantagens, sobretudo no que respeita à emissão de CO₂-eq associada à respetiva produção (quer o hidróxido quer o silicato possuem elevadas taxas de emissão de CO₂-eq) (Garcia-Lodeiro et al., 2020).

A fechar a lista de potenciais “dificuldades” à disseminação dos cimentos alcalinos na indústria da construção, de forma geral, está a questão da produção. Esta dificuldade, tal como as duas anteriores, não será um entrave durante muito tempo, dado que a versatilidade dos processos de produção de AAC faz com que a maioria das tecnologias necessárias ao fabrico, em larga escala, de AAC, esteja já instalada nas atuais fábricas de OPS, não sendo necessário nenhum grande investimento para transformar uma fábrica de cimento Portland numa fábrica de cimentos alcalinos (Palomo et al., 2021), permitindo garantir, sem transformações avultadas, a qualidade e constância composicional dos cimentos alcalinos produzidos à escala industrial. A Figura 3 resume as principais etapas associadas à produção de cimento Portland e à potencial produção de um cimento alcalino, baseado num subproduto industrial (e.g., cinzas volantes, escória de aciaria, escória de queima de resíduos sólidos urbanos). Embora constituam trajetórias algo semelhantes, baseadas na recolha de matéria-prima e na sua subsequente preparação (nomeadamente através de calcinação e moagem), uma observação mais cuidada permite identificar várias vantagens ambientais, principalmente no que respeita às temperaturas de calcinação e na libertação de CO₂ associada aos materiais à base de cálcio, aspeto fundamental na obtenção do clínquer. Contudo, a própria recolha de matéria-prima será significativamente mais económica e ambiental e financeiramente mais económica, no caso dos cimentos alcalinos, em que os materiais foram já produzidos e requerem apenas transporte.

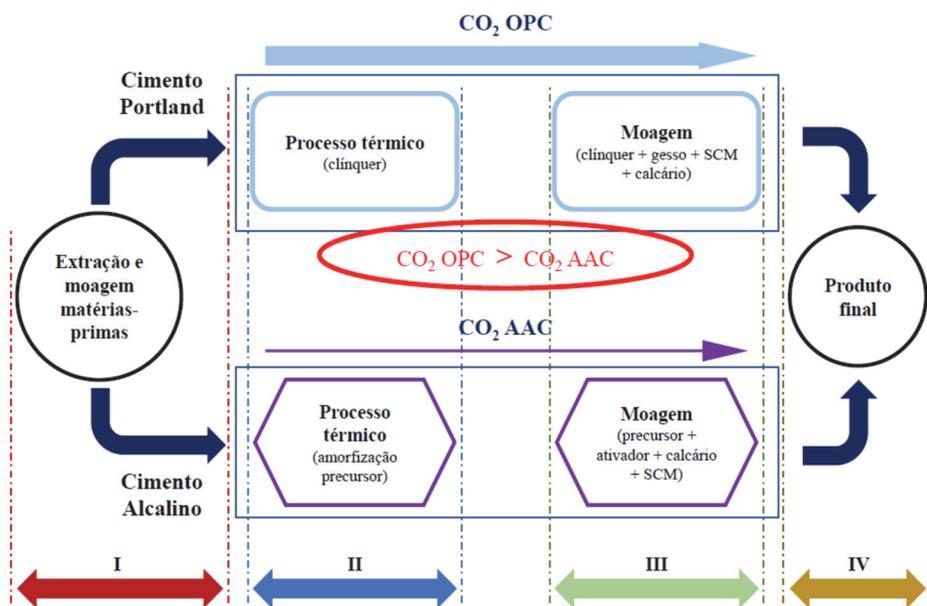


Fig. 3 – Comparação direta entre processos de produção de cimento Portland e de cimentos alcalinos (reprodução com permissão de Palomo et al., 2021).

2.2.2 – Aplicações

Além das dificuldades associadas à variabilidade composicional e estado físico dos diferentes precursores e ativadores, resultado direto da composição heterogénea de cada resíduo, subproduto ou desperdício ambiental gerado, existem, no contexto específico da geotecnia, dificuldades adicionais, incluindo, à cabeça, aquelas relacionadas com a forma de estudo dos solos ou excedentes industriais estabilizados com cimentos alcalinos. De referir que ao longo desta secção, salvo indicação em contrário, não é feita uma distinção entre solos naturais e alguns excedentes industriais com características físicas e mecânicas idênticas, como, por exemplo, as areias de fundição ou o rejeitado mineiro. De facto, as técnicas até aqui utilizadas baseiam-se fortemente (salvo nas situações em que um determinado laboratório ou grupo de investigação já desenvolveu procedimentos alternativos e específicos para estes novos materiais) nas técnicas comumente utilizadas em solos naturais e no estudo da estabilização desses mesmos solos naturais. A título de exemplo, refira-se a simples questão da avaliação da compactação dos materiais granulares estabilizados, em que a própria fase líquida da mistura contém moléculas (e.g. NaOH) que contribuem significativamente para o peso volúmico seco do material; ou o cálculo do teor em água ótimo para compactação, que terá de ser calculado através da secagem em estufa do material, o que produz alterações muito significativas no processo de cura e desenvolvimento de reações (Cristelo et al., 2018). Podendo eventualmente parecer uma questão de somenos importância, não deixa de criar constrangimentos na fase de otimização das misturas e da previsão da sua aplicação em obra.

Acresce que o uso de AAC para melhorar as propriedades geotécnicas de materiais granulares ainda é relativamente incipiente. O desempenho mecânico, sobretudo, necessita de mais investimento a nível da investigação das suas capacidades, limitações, comportamento e, muito importante, das dificuldades logísticas associadas à sua aplicação em obra, dado tratar-se de um ligante que, normalmente, envolve mais componentes e pode, em alguns casos, ser mais sensível às condições na fase de preparação, aplicação e cura.

2.2.3 – Caso de estudo

Um dos exemplos mais relevantes do potencial dos AAC em geotecnia e, concretamente, na estabilização de camadas de base ou sub-base de pavimentos, foi desenvolvido recentemente, em Portugal, no âmbito de uma colaboração entre duas universidades nacionais e uma das principais empresas de construção portuguesas.

Foi construído um trecho experimental com um total de 80 m de camada estabilizada, com 2,5 m de largura, utilizando cinco ligantes diferentes, três dos quais baseados na ativação alcalina de excedentes industriais, sendo que os outros dois (cal e cimento Portland) foram incluídos de modo a criar referências para futuras comparações (Miranda et al., 2020). Cinzas volantes, resultantes da queima de carvão na Central do Pego, constituíram o precursor utilizado nos três AAC. Em dois casos, essas cinzas foram ativadas através de uma combinação de hidróxido de sódio e silicato de sódio, enquanto no terceiro caso foi utilizado igualmente um resíduo industrial, nomeadamente uma solução alcalina originalmente utilizada para limpar matrizes de extrusão de alumínio.

O desempenho de cada secção do trecho foi avaliado aos 36 e 90 dias de cura, e incluiu ensaios de FWD e ensaios de carga em placa, e a determinação, em amostras extraídas diretamente no pavimento, da resistência à compressão simples. A preparação do local teve início 48 horas antes do início do trecho estabilizado, e envolveu a remoção de uma fina camada de solo superficial; ensaios de FWD ao longo do eixo; e avaliação do teor de água em vários pontos (gamadensímetro). Devido às diferenças significativas entre o teor em água *in situ* e o teor em água necessário (determinado previamente em laboratório, para cada uma das 5 soluções), optou-se por reduzir o teor em água através da mistura com 3% de óxido de cal. Este procedimento foi realizado 24 horas antes da estabilização, mas não foi totalmente eficaz, resultando na compactação das camadas estabilizadas no lado húmido das respetivas curvas de compactação Proctor.

Antes da construção dos segmentos FA20a, FA20b e FA20CS, foi necessário calibrar a vazão de FA por metro quadrado. Os segmentos estabilizados com cimentos álcali-ativados foram construídos com a seguinte sequência: i) distribuição de aproximadamente 1/3 do volume de cinzas pré-determinado (Figura 4a), seguido de uma primeira passagem da misturadora (calibrada para uma espessura de 20 cm); ii) repetição da etapa i; iii) Espalhamento manual de aproximadamente 1/2 do peso predeterminado de ativadores alcalinos (Figura 4b), seguido de mais uma passagem da misturadora (uma espessura de 20 cm foi novamente visada); iv) repetição da etapa i; v) repetição da etapa iii; vi) compactação da mistura estabilizada, segundo o procedimento tradicionalmente utilizado. A carotagem das várias secções de pavimento (Figura 4c) permitiu a determinação da resistência à compressão simples, em laboratório, que revelaram valores muito semelhantes obtidos com a solução tradicional (i.e., OPC), e com todas as soluções AAC, das quais se destaca a solução que utilizou um ativador-resíduo (Figura 4d).

2.3 – Desafios do projeto à obra

2.3.1 – Metodologia

Tradicionalmente nas infraestruturas lineares de transporte, como é o caso das rodovias e ferrovias, assumiu-se desde sempre uma política de equilíbrio de materiais na sua conceção e construção, com principal relevo no balanço de terras, uma vez que este também era o mais relevante em termos quantitativos. Este equilíbrio prevenia desde logo a produção de resíduos, atuando-se assim no primeiro pilar de gestão – a prevenção (Sousa e Monteiro, 2009). A conceção destas infraestruturas combina as exigências geométricas de traçado adequadas ao seu desempenho, a sua inserção na orografia existente e as condições geotécnicas decorrentes do ambiente geológico que é atravessado em cada momento. Tal conduziu a uma prática, consolidada em termos de projeto e validada tecnicamente no domínio da geotecnia de reutilização preferencial na própria obra dos solos e rochas escavados.



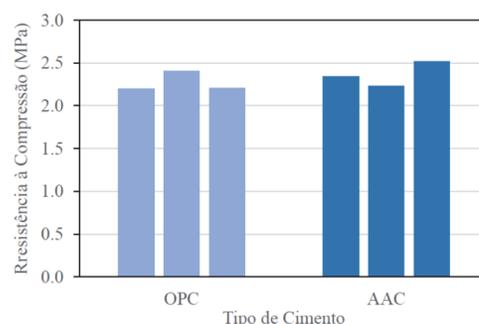
a)



b)



c)



d)

Fig. 4 – Evolução do processo construtivo de secção do trecho experimental baseada em cimentos alcalinos: a) espalhamento do precursor (i.e., cinzas volantes); b) espalhamento do ativador (i.e., hidróxido de sódio seco); c) aspeto de carotes recolhidas; d) resistência à compressão em carotes recolhidas nas secções construídas com OPC e com AAC.

A crescente tomada de consciência das questões ambientais e a sua transposição para normativos legais, que obrigam a estudos de impacto e a processos de avaliação ambiental, fez emergir frequentemente outros conjuntos de prioridades na definição de traçados em desprimento de soluções equilibradas de terraplenagem, originando assim a movimentação de volumes significativos de materiais de empréstimo e a depósito. De igual modo, o atravessamento de zonas sensíveis, como é o caso das áreas urbanas, podem levar à necessidade de adoção de soluções geotécnicas distintas, como obras de contenção ou túneis, que, embora possam contribuir para a redução dos volumes totais de terraplenagem, tendem a limitar a reutilização de materiais escavados, que têm de ser transportados para destino final adequado com consequências económicas e ambientais.

Também o atual Regime Geral de Gestão de Resíduos traz novos desafios aos projetos e empreitadas de infraestruturas de transporte, em especial, na caracterização, eventual transformação e quantificação dos resíduos a reutilizar. Desafios estes que se estendem ao fluxo dos geomateriais excedentes, que passarão a ser geridos de acordo com as regras associadas à gestão de resíduos.

Se atualmente a utilização de materiais não convencionais e renováveis se encontra tecnicamente suportada para um conjunto importante de materiais, a escala a que estes se encontram disponíveis nem sempre é compatível com as necessidades destas infraestruturas lineares. Acresce,

que o seu processo de valorização pode trazer um incremento de custos que diminui ou condiciona fortemente a sua competitividade face aos materiais tradicionais.

O caminho da utilização de ligantes na estabilização de solos *in situ* ou de resíduos industriais a utilizar como material granular, que agora enfrentam novos desafios, tem demonstrado ser bastante versátil nas suas aplicações, com ligantes de cal ou de cimento, em especial, na estabilização/reutilização de materiais com fracas características geotécnicas ou no reforço do desempenho de geomateriais em zonas nobres de terraplenagem, existindo cadernos de encargos com especificações técnicas para o efeito. Estas soluções, tem implicações ambientais positivas face ao potencial de redução do volume de terraplenagens, e, consequentemente, no consumo de energia. A mistura de solos com ligante e água pode ser efetuada em central ou *in situ*, sendo espalhada e compactada em continuidade, revelando-se uma tecnologia muito competitiva do ponto de vista económico. Em obras lineares extensas, a utilização de equipamentos que processam as misturas *in situ* torna-se mais interessante tendo em atenção a sua mobilidade (Fernandes et al., 2016).

Outro dos aspetos que emergem como relevantes no âmbito na transição eco-digital das infraestruturas lineares de transporte é a resiliência, tema que também se encontra incluído no plano estratégico 2020-2023 do Comitê Técnico 4-3 “Terraplenagem” da Associação Mundial de Estradas (PIARC, 2021). No âmbito das terraplenagens e das estruturas geotécnicas, entende-se como adequada a definição proposta por Onishi et al. (2018) para sistemas de transporte, de acordo com a qual a resiliência é: “a capacidade do ativo de resistir a choques de forma a minimizar as perdas de funcionalidade (ou seja, robustez ou resistência) e a capacidade do ativo de recuperar a funcionalidade em várias dimensões após um evento de desastre (ou seja, recuperabilidade)”.

Neste contexto, a resiliência dos ativos geotécnicos é suportada pela interligação dos pilares constituídos pelas especificações técnicas de projeto e pelas condições técnicas na construção (Cadernos de Encargos), em função do pilar das condições geológicas vigentes e dos geomateriais e/ou materiais não convencionais que se entendam aplicar (Figura 5).

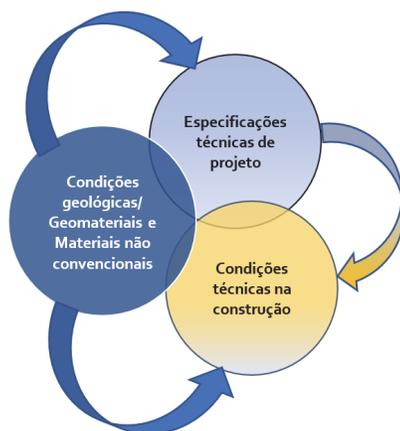


Fig. 5 – Interligação das especificações técnicas de projeto e as condições técnicas na construção, em função das condições geológicas e dos geomateriais e/ou materiais não convencionais.

2.3.2 – Exemplo de aplicação

O troço da autoestrada A4 entre Amarante e Vila Real, que engloba o túnel do Marão, desenvolve-se a meia encosta em zona de orografia acidentada. A inserção do traçado rodoviário nesta zona de montanha obrigou a um exercício de equilíbrio em relação, para além do desenho e construção de várias estruturas de contenção em aterro reforçado, ao desenvolvimento de soluções

em solo-cimento para a execução de aterros de grandes dimensões, com altura máxima da ordem de 70 m. A Figura 6 mostra o perfil transversal tipo e as características gerais das soluções em aterro. Estes aterros, cujas principais características são apresentadas no Quadro 1, foram construídos com material do tipo solo-enrocamento com os espaldares reforçados em solo-cimento (adição de cimento na proporção ponderal de cerca de 3 a 4%).

A adoção destas soluções em aterro, com a execução *in situ* dos espaldares reforçados em solo-cimento, permitiu incorporar um volume importante de materiais provenientes das escavações da linha e do túnel do Marão, mantendo uma ocupação de terreno razoável devido à possibilidade de adotar maiores inclinações dos taludes (V/H=1/1). Estas soluções permitiram a rentabilização sustentável dos recursos locais e ficaram bem integradas na paisagem.

Quadro 1 – Características gerais dos aterros (Elsamex, 2014a e 2014b).

Características gerais	Designação do aterro			
	M14	M24	M40	M41A
Extensão longitudinal (m)	558	423	304	336
Altura máxima (m)	69	55	24	52
Número de banquetas	4	3	0	2
Largura máxima dos espaldares (m)	20	16	7	10
Volume de solo-cimento (m ³)	175000	125000	30000	85000
Volume de aterro (m ³)	510000	175000	20000	210000

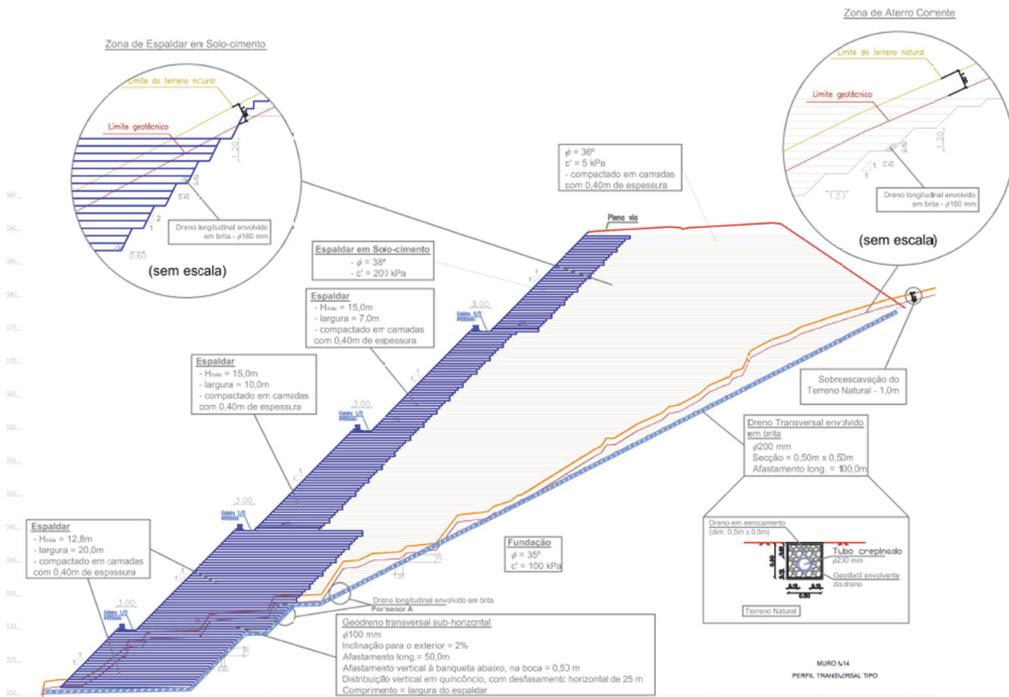


Fig. 6 – Perfil transversal tipo e características gerais das soluções em aterro com espaldares reforçados em solo-cimento (Fernandes et al., 2016).

Para a confirmação dos pressupostos de projeto foi desenvolvida uma metodologia para a definição da mistura de solo-cimento a aplicar em obra assim como a sua técnica de aplicação, que se representa de forma esquemática na Figura 7. Em fase de obra, consentaneamente com o processo de controlo de qualidade definido para os aterros, foi efetuado o controlo dos parâmetros relativos ao solo-cimento, recorrendo à execução de ensaios de laboratório e *in situ*, primeiro em aterros experimentais, e de modo sistemático, durante a construção destes aterros.

Estas estruturas de aterro enquadraram-se naturalmente na paisagem com o crescimento de vegetação autóctone, sem ser necessário o recurso a sementeiras. A observação do comportamento destes aterros tem vindo a demonstrar o seu bom desempenho ao longo de uma década.

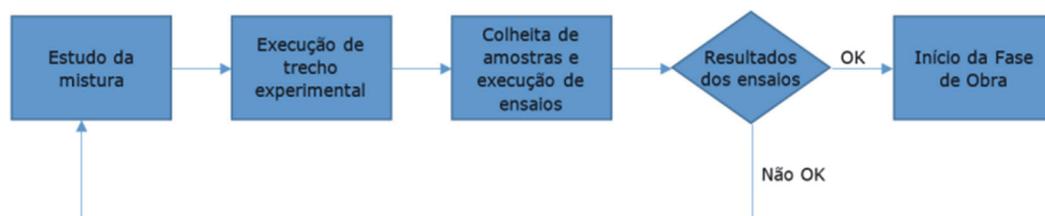


Fig. 7 – Metodologia para a definição da mistura de solo-cimento a aplicar em obra (Fernandes et al., 2016).

3 – INOVAÇÃO NA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL

3.1 – Desafios

De acordo com a agenda 2030 das Nações Unidas (ONU), os sistemas de transporte precisam de ser melhorados para garantir que sejam mais seguros, acessíveis, sustentáveis e contribuir para a segurança rodoviária. Por todo o mundo, as estradas são as vias de comunicação essenciais para transportar pessoas, bens e serviços. O trabalho para construir e manter esta vasta rede de sistemas de transporte é tão crítico quanto desafiante. As empresas de construção trabalham por vezes em condições muito difíceis para construir ou manter as estradas. Mas gerir este trabalho pode ser muito complexo já que estes processos envolvem grandes equipas, normalmente dispersas, que precisam de elevada coordenação e de dados que se encontram frequentemente fragmentados ou são mesmo inexistentes. Como resultado, as obras são frequentemente atrasadas, ficam acima do orçamento ou são pouco eficientes.

Nos grandes projetos de construção, os custos operacionais do equipamento representam, em média, mais de 30% do orçamento do projeto e, muitas vezes, são uma das principais causas de derrapagens dos orçamentos no setor da construção. Em grande medida, estas derrapagens são o resultado de sistemas de controlo obsoletos que não fornecem relatórios precisos e abrangentes em tempo real, sobre o desempenho e a utilização dos recursos afetos a cada atividade durante o ciclo de vida do projeto. Por outro lado, não se está a fazer bom uso de dados que estão a ser acumulados e que podem, no futuro, ter enorme valor económico.

3.2 – Desenvolvimentos com aplicação às terraplenagens

3.2.1 – Sistemas de apoio à decisão

Tipicamente, os processos de terraplenagem são caracterizados por elevados níveis de incerteza e, subsequentemente, pela necessidade de existir flexibilidade suficiente por parte das equipas de planeamento e de gestão para lidar com imprevistos de natureza diversa, podendo ser tão variados

como alterações desfavoráveis das condições atmosféricas a avarias de equipamentos. Na maior parte dos projetos de construção que abrangem terraplenagens, a capacidade de criar um plano robusto e flexível suficiente para permitir ajustes como resposta a eventos imprevisíveis é proporcional à experiência das equipas de planeamento e gestão. No entanto, tendo em conta que esta experiência nem sempre está facilmente acessível, a importância do apoio à decisão é enfatizada. De facto, uma das vantagens dos sistemas de apoio à decisão é a capacidade de compilar e estruturar o conhecimento e experiência proveniente de obras anteriores, seja por meio do conhecimento adquirido por peritos e guias/normas, seja com recurso à análise de bases de dados de obras passadas (i.e., *Machine Learning*). Para além disso, o fato de facilitarem o contacto/colaboração entre várias especialidades e equipas (e.g., gestão de equipamentos, orçamentação, planeamento) ao longo de todas as fases do ciclo de vida de projetos de construção (e.g., concurso, projeto e planeamento, construção) vai de encontro a conceitos tais como Construção 4.0 e *Building Information Modelling* (BIM), cujo impacto positivo no setor tem sido comprovado recorrentemente nos últimos anos.

No caso específico das terraplenagens, o apoio à decisão é geralmente procurado no sentido de prever (e.g., comportamento dos geomateriais, segurança de taludes, produtividade de equipamentos em função de condições de trabalho) (Marques et al., 2008; Parente et al., 2014; Tinoco et al., 2017), monitorizar (e.g., posição de equipamentos de transporte, tempos de inatividade, avarias mecânicas) (Parente et al., 2018), otimizar (e.g., distribuição de volume de geomateriais entre frentes de escavação e aterro, minimização de distâncias de transporte, alocação ótima de recursos mecânicos) (Parente et al., 2015; Parente et al., 2022), ou combinações dos anteriores. Baseando-se em tecnologias como a inteligência artificial, simulação, algoritmos de otimização e sensorização, estes sistemas podem ser divididos de acordo com a metodologia adotada e os objetivos do apoio à decisão. Por um lado, tem-se o apoio ao planeamento, tipicamente baseado em sistemas de previsão ou de otimização robusta, cuja postura é a de criar planos robustos que não só abarquem os trabalhos previsíveis a realizar, mas também incluam planos de contingência para potenciais situações disruptivas. Por outro lado, tem-se o apoio à construção, por sua vez focados em sistemas de monitorização e otimização reativa, que preconizam a máxima flexibilidade no que concerne ao ajuste constante do planeamento inicial em resposta a ambientes mais voláteis ou à possibilidade de ocorrências imprevisíveis.

As subseções 3.2.2 e 3.2.3 apresentam um exemplo ilustrativo do potencial deste tipo de sistemas em fases de planeamento e construção, respetivamente, adotando como referência um caso de estudo real associado às fases de terraplenagem de uma obra de construção rodoviária em Portugal. A obra consistiu em 24 frentes de construção de aterro, que foram alimentadas por 15 frentes de escavação. O volume total de geomaterial processado foi aproximadamente 1500000 m³ ao longo de uma extensão aproximada de 20 km de trecho de autoestrada, sendo a previsão da duração média estimada dos trabalhos de cerca de 6 meses. A frota de equipamentos contou com um total de 6 cilindros compactadores, 14 equipamentos de espalhamento, 29 escavadoras e 39 camiões de transporte de geomateriais. Para obter os resultados apresentados, procedeu-se a uma simulação de condições de obra próximas das reais, utilizando como recursos disponíveis apenas os acima mencionados para desenvolver os trabalhos de acordo com as práticas já usualmente utilizadas na indústria. A metodologia adotada baseou-se no trabalho desenvolvido por Gomes Correia e Magnan (2012) e Parente et al. (2022), tendo como objetivo encontrar as soluções ótimas de alocação da frota de equipamentos pelas frentes de trabalho e ao longo do tempo, minimizando simultaneamente custos e duração de execução da obra (otimização multiobjetivo).

3.2.2 – Planeamento de um caso de obra

Como mencionado anteriormente, o propósito desta simulação de obra foi criar a oportunidade de demonstrar as potencialidades destas tecnologias para a alocação ótima da frota de equipamentos. Naturalmente, tendo em conta a natureza dinâmica do problema, que corresponde a uma série de

frentes de obra (i.e., escavações e aterros) que devem ser concluídas sucessivamente (mas não necessariamente sequencialmente), a solução adotada tem também de ser de natureza dinâmica. Por outras palavras, durante a obra existem várias equipas de escavação e de compactação cujo trabalho nas frentes respetivas irá ser concluído em alturas diferentes. Quando o trabalho numa frente é concluído, existe uma equipa (de escavação ou de compactação, dependendo da frente) cuja atividade deve continuar noutra local (i.e., iniciando-se outra “fase de trabalho”). No entanto, tendo em conta que as condições de trabalho nesta fase já não são as mesmas comparativamente às condições existentes na fase de trabalho anterior (i.e., as distâncias de transporte serão eventualmente diferentes, assim como os tipos de geomaterial nas novas frentes de escavação/compactação e até o espaço disponível na frente de trabalho), justifica-se que, em cada nova fase de trabalho, seja revista a alocação das equipas ativas para garantir que a alocação continua a ser ótima em termos globais do projeto. Assim, procura-se constantemente garantir que os trabalhos procedem de maneira ótima em função da minimização do custo e da duração global da obra, em oposição a uma otimização local que só se referiria à fase de trabalho atual.

Para atingir estes objetivos, o sistema solicita informação/*inputs* relativos a:

- Recursos mecânicos disponíveis, incluindo cilindros compactadores, espalhadores (e.g., bulldozers, motoniveladoras), escavadoras e camiões de transporte, assim como uma série de especificações dos mesmos (e.g., no caso dos camiões de transporte é solicitado o modelo, a capacidade de carga, e os custos associados à sua utilização e aluguer, se aplicável), como exemplificado na Figura 8a.
- Trabalho a desenvolver, nomeadamente no que concerne às frentes de escavação e de aterro, assim como a sua localização, o tipo e volume de geomaterial associado, o número máximo de equipamentos que pode estar ativo na frente em simultâneo e, finalmente, as distâncias entre frentes de escavação e de aterro (Figura 8b).

Com acesso a estes dados, o algoritmo de otimização que gere o sistema, baseado num *non-dominated sorting genetic algorithm II* (NSGA-II) (Deb et al., 2002), é capaz de procurar a melhor solução de alocação de recursos ao longo de todo o desenvolvimento da obra. De notar que este cálculo pode incluir a minimização das distâncias de transporte entre frentes de escavação e aterro e respetivos volumes, ou esta pode ser definida diretamente pelo utilizador (e.g., com base num diagrama de Brückner previamente determinado pelo equipa de projeto/planeamento). Tendo em conta que este processo se refere a uma otimização multiobjetivo, cuja duração aproximada foi de 3 horas, as soluções encontradas são apresentadas em formato de Pareto. Numa frente de Pareto, uma solução é considerada ótima (ou não-dominada) se nenhum dos objetivos de minimização puder ser melhorado sem piorar o outro. Por outras palavras, as soluções apresentadas e ilustradas na Figura 9 (cada ponto corresponde a uma alocação de equipamentos, avaliada pelo sua duração e custo associados) correspondem a *trade-offs* ótimos entre tempo e custo (i.e., sendo objetivos conflituosos, as soluções mais rápidas corresponderão também a custos superiores, e vice-versa). A apresentação dos resultados neste formato fornece uma maior flexibilidade no contexto do apoio à decisão, permitindo à equipa de planeamento a análise de vários cenários possíveis e a escolha do melhor em função do tempo, custo e da própria alocação, que pode ser consultada para cada solução. Esta consulta pode ser feita em vários formatos, sendo dois dos mais intuitivos o formato *spreadsheet* (i.e., em que cada linha corresponde a informação cronológica de cada equipamento referente à sua localização na frente de trabalho a que foi alocado em cada instante da obra), ou o formato de mapa, como exemplificado na Figura 10 para a solução “S6”, permitindo uma visualização no espaço dos equipamentos alocados em cada frente e para cada fase de trabalho.



a)



b)

Fig. 8 – Inputs do sistema: a) recursos disponíveis; b) frentes de trabalho.

3.2.3 – Aplicação à fase de construção

A presente simulação assumiu que, durante a fase de construção, existe a integração de sensores de posicionamento GPS nos camiões de transporte, o que permite aferir o número de ciclos realizados por cada camião num determinado espaço de tempo, dando assim indicação da produtividade dos mesmos em termos de volume transportado (tendo em conta uma capacidade média de volume de material transportado). Seguindo esta lógica, torna-se possível aferir igualmente a produtividade das equipas de escavação às quais os equipamentos de transporte estão associados durante o ciclo de carga, assim como a das equipas de compactação que recebem material durante o ciclo de descarga. Deste modo, é possível obter algum nível de monitorização de todos os equipamentos ativos com um custo e uma intervenção mínima apenas nas equipas de transporte (instalação de GPS em cada camião).



Fig. 9 – *Output* do sistema em fase de planeamento, em forma de frente de Pareto de soluções ótimas.

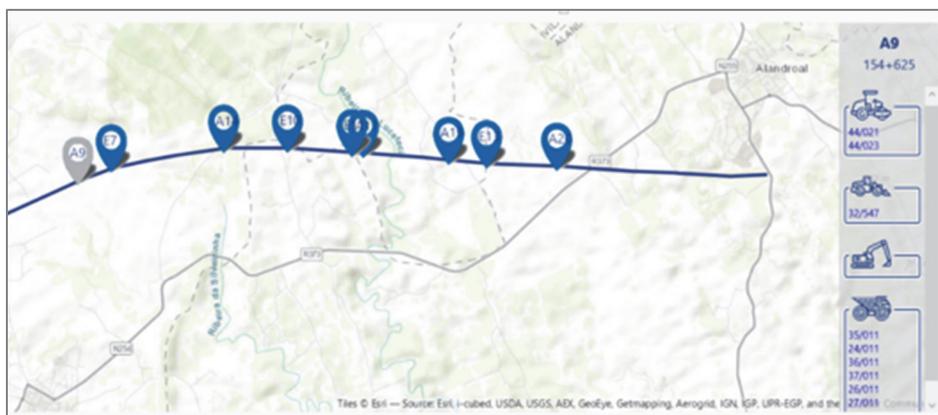


Fig. 10 – Exemplo ilustrativo de um dos tipos de visualização da alocação correspondente à solução “S6”.

Apesar da produtividade aferida nas fases iniciais ser meramente indicativa, uma vez que se está a assumir que os equipamentos de transporte são carregados a 100% da sua capacidade, o valor da produtividade é corrigido mensalmente no seguimento da realização de medições de topografia em cada frente de trabalho. Estas medições fazem já parte do processo normal de desenvolvimento de obras de terraplenagens para controlo de qualidade regular, pelo que não está a ser inserida disrupção

no andamento usual dos trabalhos. Ao ter uma noção exata das quantidades de volume de geomaterial escavado e aterrado como resultado destas medições de topografia, estes valores podem ser comparados aos estimados pelo sistema, que é determinado pela capacidade dos camiões e o número de ciclos. Assim, para corrigir o fato da carga média transportada dos camiões poder ser diferente da máxima, a produtividade dos camiões é afetada um fator corretivo, k (equiparável ao fator de eficiência usado nos cilindros de compactação), proporcional à razão entre os volumes reais de geomaterial processado, resultante das medições topográficas, e o valor estimado pelo sistema através do número de ciclos de carga/descarga realizados.

Neste contexto, a partir do momento em que a fase de construção se inicia, o sistema passa automaticamente a iniciar-se em modo de monitorização e controlo. A Figura 11 ilustra o funcionamento normal do *dashboard* de controlo, onde se pode monitorizar o desenvolvimento geral da obra, a produtividade aferida por frente de trabalho ativa (personalizável pelo utilizador), a posição dos equipamentos de transporte em tempo real por visualização do mapa e ainda ter acesso a uma série de notificações relativas a potenciais problemas que possam justificar a intervenção do utilizador (e.g., equipamentos com produtividade mais baixa do que esperado, camiões fora da rota planeada, equipamentos parados/inativos, entre outros). Este *dashboard* permite também aceder a qualquer momento ao histórico de atividades, assim como à função de edição dos parâmetros e características da obra. Esta última função é a que permite executar variadas correções ou ajustes ao planeamento, tais como o fato de alguns equipamentos poderem deixar de estar disponíveis por motivo de avaria, alterações aos tipos de geomateriais nas frentes que podem ser diferentes dos esperados após estudo geotécnico, ou a correção aos volumes e produtividades dos equipamentos associados resultante das medições topográficas mensais acima mencionada. Dependendo da sua magnitude, qualquer alteração efetuada induz o sistema a recalcular os custos e a duração em cada fase subsequente para as novas condições de trabalho, dando ao utilizador a alternativa de continuar com o planeamento atual, aceitando as novas previsões de custo e duração, ou solicitar ao sistema uma realocação dos recursos de modo a garantir que os trabalhos procedem de modo ótimo, conforme se exemplifica na Figura 12.

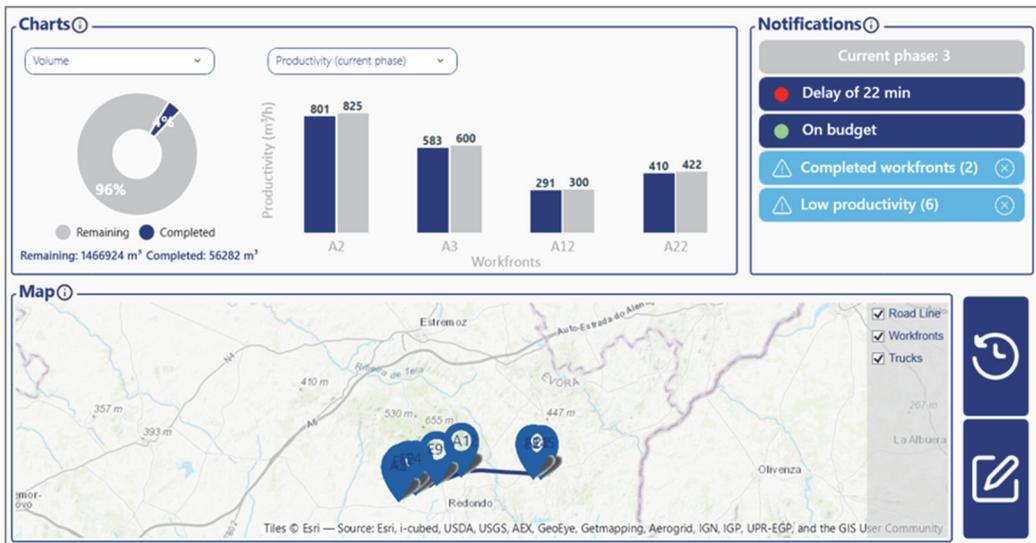


Fig. 11 – *Dashboard* de monitorização e controlo para a simulação de obra realizada.

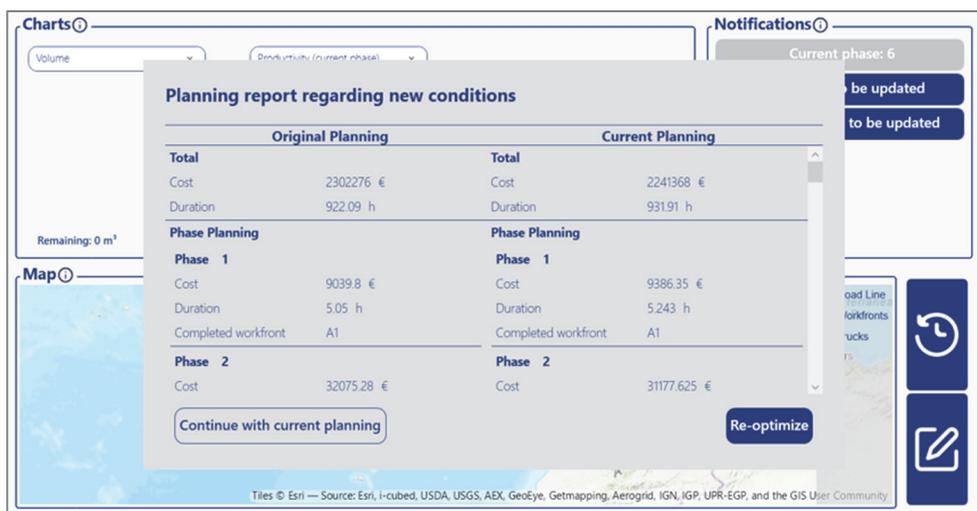


Fig. 12 – Tabela relatório resultante da alteração dos volumes de uma frente e das produtividades dos camiões associados em conformidade resultante de uma medição topográfica (disparidade de volumes de cerca de 9% numa frente de compactação).

No caso em que o utilizador opte por proceder à re-otimização da alocação dos recursos ativos no seguimento da avaria de um equipamento de transporte durante a fase de trabalhos 18 do planeamento original, a frente de Pareto atingida pelo sistema para as novas condições de otimização seria ajustada. Uma vez que a re-otimização foi realizada já na fase 18, existem consideravelmente menos trabalhos a realizar para que sejam atingidos os objetivos de conclusão do projeto, pelo que o tempo de cálculo foi consideravelmente menor (~1h). Mais uma vez, as potenciais soluções estão avaliadas pelos objetivos de minimização. Porém, a função de re-otimização acrescenta um terceiro objetivo de minimização ao processo de otimização multiobjectivo, correspondente ao RAD (*Re-Allocation Disruption*), representado por um valor associado a cada uma das soluções representadas na Figura 12. Este terceiro objetivo prende-se com o “custo” de realocar qualquer tipo de equipamento para uma frente diferente durante a fase de construção. Por outras palavras, o valor do RAD aumenta linearmente com o número de alterações de equipamentos de uma frente de trabalho para outra como consequência da redistribuição efetuada por parte do algoritmo durante a re-otimização. Assim, ao adotar o RAD como terceiro objetivo de minimização, também é otimizado o tempo associado à reorganização da frota de equipamentos durante a fase de construção, reduzindo a “disrupção” em obra resultante de alterar vários equipamentos para outra frente de trabalho em simultâneo. O valor do RAD permite à equipa ou utilizador um fator adicional de apoio à decisão tendo em conta este aspeto, podendo ser útil ao comparar potenciais soluções de mérito semelhante, por exemplo.

À semelhança das soluções anteriores, é possível aceder à visualização das alocações correspondentes a cada solução. Note-se que, por meio do processo de otimização, o sistema acaba por levar a cabo não só a função de alocação dos recursos disponíveis, mas também a de seleção da frota ótima, evitando utilizar recursos que possam ser antes utilizados para outras atividades ou obras. Isto é especialmente relevante ao selecionar a função de re-otimização nas fases finais da obra, uma vez que a menor quantidade de trabalhos restantes para a conclusão da obra poderá não justificar a alocação de todos os recursos disponíveis naquele momento.

Finalmente, um último aspeto relevante está relacionado com a nomenclatura das soluções na re-otimização. Neste exemplo, a nova solução selecionada foi a “S6.3”, correspondendo à ligação do nome da solução inicial escolhida (S6) com a solução 3 da re-otimização, facilitando a leitura do histórico de soluções adotadas e respetivos ajustes ao longo da obra, tal como ilustrado na Figura

13. Para além de disponibilizar toda a informação referente às soluções e ajustes ao longo do projeto, o histórico permite também observar todas as notificações que surgiram durante a obra e até a produtividade individual de cada equipamento sensorizado ao longo do tempo (neste caso, apenas dos equipamentos de transporte). Como resultado, é criada uma base de dados descritiva da obra e do desenvolvimento dos trabalhos, permitindo análises futuras de natureza variada, tais como auditorias, análises estatísticas, ou aplicações de inteligência artificial capazes de extrair conhecimento de bases de dados ricas em informação.



Fig. 13 – Histórico das soluções adotadas, acessado no final da conclusão da simulação.

3.3 – Desenvolvimentos com aplicação aos pavimentos

3.3.1 – A digitalização do processo de pavimentação

A construção é ainda vista como uma atividade conservadora e a pavimentação não é exceção. Se a construção, em geral, começa a adotar tecnologias digitais, a pavimentação está ainda mais longe disso. A maior parte dos processos continuam atualmente a ser geridos como no passado: comunicação pouco eficiente, falta de registo sistemático de informações, falta de informação e processos colaborativos, utilização de máquinas não digitais ou conectadas, dificuldades de interrelacionar várias especialidades, áreas ou empreitadas. Embora sejam visíveis alguns indícios de evolução nos índices de digitalização nas grandes empresas de construção, na esmagadora maioria do setor da construção, representado por empresas de pequena e média dimensão, ainda não se observam sinais de evolução relevantes ou que sejam úteis para os desafios de competitividade e sustentabilidade que já se encontram na ordem do dia e que são prementes.

É por isso absolutamente necessário criar condições que permitam, qualquer empresa ou agente do setor da construção, darem passos rumo à digitalização dos seus processos construtivos de uma forma que seja: 1) comportável economicamente; 2) sustentável ambientalmente; e 3) realizável do ponto de vista de fatores humanos.

Focando a discussão na problemática dos pavimentos rodoviários, o equipamento associado acaba por ter um dos papéis mais relevantes na produção de dados necessária à digitalização. Este equipamento, embora na maioria dos casos funcionais na sua função primária, refere-se a máquinas por vezes com dezenas de anos e sem qualquer capacidade digital: sem sensores, não conectadas, sem interfaces de comunicação, sem software ou interfaces de controlo orientadas à eficiência da

sua operação. A solução mais imediata seria a renovação destas máquinas para modelos mais modernos que existem já com todo o tipo de funcionalidades possíveis e que colmatam quase todas as lacunas: descartar e comprar novas máquinas. Contudo, do ponto de vista económico, faltam à maioria das empresas de pequena e média dimensão (a esmagadora maioria do setor) as capacidades económicas para o fazer. Por outro lado, as máquinas existentes cumprem com a sua função primária: transportar, espalhar, compactar, etc., e, por isso, não existem vantagens óbvias aos decisores em descartá-las para efetuarem novas aquisições. Há também a questão ambiental associada no que diz respeito ao fim-de-vida destas máquinas com uma enorme pegada ambiental associada. Torna-se por isso necessário oferecer soluções ao setor para um problema de praticidade que existe na digitalização deste tipo de processos.

Uma potencial solução é a conversão, a melhoria ou a beneficiação destes equipamentos já existentes, num esforço intitulado de *retrofit*. Uma abordagem típica passa por sensorizar as máquinas, ligar estes sensores a uma unidade de processamento, processar localmente alguma desta informação para dar suporte ao operador e transmitir todos os dados para uma nuvem de forma a garantir os benefícios do uso dos mesmos de uma forma central e coordenada. A título exemplificativo, na Figura 14 pode observar-se a realização de uma experiência, integrada no projeto REV@Construction, relativa à introdução de um sistema de aquisição da temperatura do pavimento numa pavimentadora que não dispunha dessa tecnologia. Neste caso, poder-se-á dizer que esta máquina beneficiou de um *retrofit* para dispor de uma funcionalidade muito útil para o processo, quer na operação quer no controlo de qualidade, e que se evitou assim a necessidade de a substituir com todo o impacto económico e ambiental associado. Com este *retrofit*, a mesma máquina tornou-se digital e, portanto, mais útil e eficiente. Existem já várias soluções no mercado deste tipo e projetos de investigação como é exemplo um projeto de digitalização de camiões de transporte de terras onde se criou uma solução de *hardware* agnóstica ao fabricante que transforma camiões tradicionais em camiões conectados e sensorizados (Pereira et al., 2022).



Fig. 14 – Experiências de incorporação de uma câmara térmica em pavimentadora.

No que concerne ao pavimento em si, os desafios da digitalização prendem-se tipicamente com a adoção de sistemas de monitorização do estado de conservação dos pavimentos (Amândio et al., 2021). Devido à inerente dimensão das redes de estradas, que são normalmente bastante extensas, há por isso desafios muito significativos em conseguir assegurar a sua monitorização em toda a extensão. Atualmente, grande parte dos sistemas está desenhado para processos de inspeção periódica, o que faz com que exista pouca informação sobre os pavimentos e, conseqüentemente, os

custos de conservação sejam maiores e as interrupções de tráfego aconteçam com mais frequência. As abordagens ao problema têm incidido essencialmente em monitorizar, por amostragem, determinados troços das vias utilizando sensores fixos (como fibras óticas, por exemplo) ou através de veículos ou meios móveis que percorrem as mesmas utilizando tecnologias como a visão computacional, LIDAR ou mesmo georadar. Existem por isso essencialmente dois tipos de monitorização do pavimento: monitorização dinâmica e monitorização estática. A escolha do tipo mais adequado depende de vários fatores como o tipo de análise a realizar ou o tipo de pavimento (Shtayat et al., 2020).

A digitalização do processo de pavimentação é geradora de um volume significativo de dados cuja gestão representa um enorme desafio. A indústria da construção em geral já lida com grandes volumes de dados heterogéneos, que deverá aumentar exponencialmente à medida que tecnologias como as redes de sensores e a Internet das Coisas se tornem cada vez mais utilizadas e úteis para os esforços de digitalização (Bilal et al., 2016). Quando o volume de dados é pequeno, o tipo de ilações a tomar é relativamente evidente, fazendo com que estes dados sejam tipicamente apenas instrumentais para as aplicações que os gerem como é o caso da geolocalização de máquinas, o consumo de combustível ou o registo de produtividade. Pode ser disso exemplo, um empreiteiro geral que rastreia onde estão as suas máquinas, calcula consumos e verifica se os seus trabalhadores ou atividades estão a ser eficientes. Contudo, quando o volume e diversidade de dados começa a avolumar, para além do referido, surgem outras possibilidades e pode passar a falar-se em *Big Data* e as possíveis aplicações. Muitas vezes habilitadas por inteligência computacional, estas aplicações elevam as empresas a um novo patamar de eficiência e de competitividade. Para se considerar um volume de dados como *Big Data* são necessárias enormes quantidades de informação armazenadas em sistemas baseados em nuvem que pessoas selecionadas podem aceder de qualquer local a qualquer momento: trabalhadores, informáticos, subcontratados e até pessoas com perfil administrativo (Vasenev et al., 2014). Estes dados podem vir de sensores, pessoas (pessoas como sensores), computadores, *smartphones*, *tablets*, outros *softwares* e muitas outras fontes de dados.

O volume muito significativo de dados pode representar vários tipos de desafios para a organização ou para a utilidade na sua utilização:

- Qualidade dos dados – Nem todos os sensores têm o desempenho que deviam pela folha de características do fabricante e, frequentemente, requerem calibração e nem todas as informações são bem registadas ou até nem sempre o seu contexto temporal ou espacial está correto. Dispor de dados pouco precisos ou errados pode induzir em erro e comprometer a operação ou o planeamento. A vulgarização da Internet das Coisas com sensores de baixo custo contribui de forma preocupante para este fenómeno. Para se poderem utilizar os dados com confiança, é preciso garantir a consistência dos mesmos através de sensores de qualidade, procedimentos cuidadosos e utilizar fontes de dados fidedignas.
- Armazenamento e processamento dos dados – A produção de um volume significativo de dados tem um custo de armazenamento e processamento dos dados que não é desprezável. Esse custo é ainda maior quando se considera a devida redundância que deve ser assegurada para os mesmos. Práticas de compactação e de reciclagem de dados podem ser necessárias para a sustentabilidade de um uso intensivo de dados.
- Anonimização – O regulamento geral de proteção de dados obriga a ter cuidados especiais na forma como se gerem dados. Numa utilização tão massiva de dados de tantas fontes e em tão grande quantidade, é relativamente fácil cometer erros que levem ao não cumprimento deste regulamento, com implicações sérias para as organizações. Por isso, práticas como a anonimização de dados devem ser levadas muito a sério.
- Valorizar dados – Acumular dados em grande quantidade pode, só por si, representar um investimento futuro mesmo que no presente ainda não haja forma de os utilizar em tempo real ou até valorizar em aplicações de inteligência computacional. Contudo, o setor da

construção, face à premente necessidade de melhorar a sua eficiência, deve, desde já, utilizar aplicações que beneficiem destes dados para influenciar as suas decisões de planeamento e operação. Em pavimentos, por exemplo, poder-se-á utilizar dados históricos do processo de pavimentação para que, em conjunto com informação de monitorização de patologias de pavimento, se possam tomar elações futuras sobre a relação entre o processo e a ocorrência de patologias e evitar assim os mesmos erros no futuro. Um exemplo disso é o sub-projeto PAV4.0 integrado no projeto REV@Construction, atualmente em desenvolvimento, que se ilustra de seguida.

3.3.2 – Exemplo de aplicação

O Projeto Mobilizador “Digital Construction Revolution – REV@CONSTRUCTION”, que tem como princípio base a concretização da Transformação Digital das empresas do setor AEC, tem um subprojecto denominado PAV4.0.

O objetivo do PAV4.0 é o desenvolvimento de uma solução digital única que permita que toda a execução da pavimentação seja monitorizada e controlada em tempo real, aproveitando ao máximo as oportunidades de digitalização e, dessa forma, permitir ganhos de eficiência, acelerando a recolha, a compilação e o tratamento dos dados em tempo real extraídos de forma automática de sistemas de sensorização nos equipamentos e mão-de-obra no local.

Os sistemas de gestão de pavimentos são uma ferramenta essencial para qualquer gestor de infraestruturas:

1. Recolha em tempo real dos dados gerados pela instrumentação de monitorização instalada nos equipamentos e/ou equipas de produção.
2. Processamento e compilação dos dados recebidos pelo sistema numa base de dados uniformizada traduzindo os dados em informação útil, tal como a produtividade atual das equipas de produção e custos associados.
3. A informação decorrente dos passos anteriores é utilizada pelo sistema para apresentar informações ao utilizador que suportarão a decisão de planeamento e operação do processo de pavimentação.
4. Todos os dados gerados são acumulados em base de dados de forma a permitir o uso de metodologias de inteligência computacional que permitirão retirar futuras elações do processo e otimizar ainda mais o processo de pavimentação.

Na Figura 15 é possível observar o esquema funcional do projeto PAV4.0 e os vários atores envolvidos no processo de pavimentação, que começa na central de misturas betuminosas (alvo também de um “retrofit”) e acaba na pavimentação com a digitalização da espalhadora e dos cilindros compactadores. O projeto captura e acumula informações como a geolocalização dos equipamentos, várias informações da central de produção de misturas betuminosas (temperatura, volume, fórmula, tipo de agregados, etc.), condições meteorológicas no local da pavimentação, temperatura de aplicação ou até o mapa das intervenções por tipo e segmentadas por marcas quilométricas.

Como referido anteriormente, um dos desafios de digitalizar um processo de pavimentação é conseguir converter as máquinas menos atuais em máquinas geo-localizadas, sensorizadas e conectadas, conforme ilustrado na subseção 3.3.1. Exemplo disso é o subprojeto PAV4.0 onde se verificou ser necessário colher dados relativos ao processo de pavimentação. Neste exemplo específico, foi a temperatura de aplicação da mistura betuminosa no pavimento. O processo de pavimentação requer que a mistura seja aplicada numa gama muito específica de temperatura, centrada em torno dos 150°C, para assegurar que o pavimento possa ser compactado convenientemente e assegurar os níveis de qualidade desejáveis. Esta medição precisa da temperatura, que seria tipicamente assegurada por pavimentadoras recentes de topo de gama, não está presente na esmagadora maioria dos equipamentos utilizados no setor. Por isso mesmo, no

âmbito do PAV4.0 foi criado um dispositivo que faz “retrofit” a cada pavimentadora para lhe providenciar estas características.

Este dispositivo, retratado na Figura 16, é composto por uma câmara de infravermelhos de 16x16 pixels de resolução, um GPS RTK de elevada resolução espacial, um módulo de Wi-Fi e microcontroladores diversos, para providenciar uma medição precisa de uma linha de 16 pontos de medição de temperatura agrupando em 4 zonas de temperatura média, com uma montagem na pavimentadora conforme se ilustra na Figura 17.

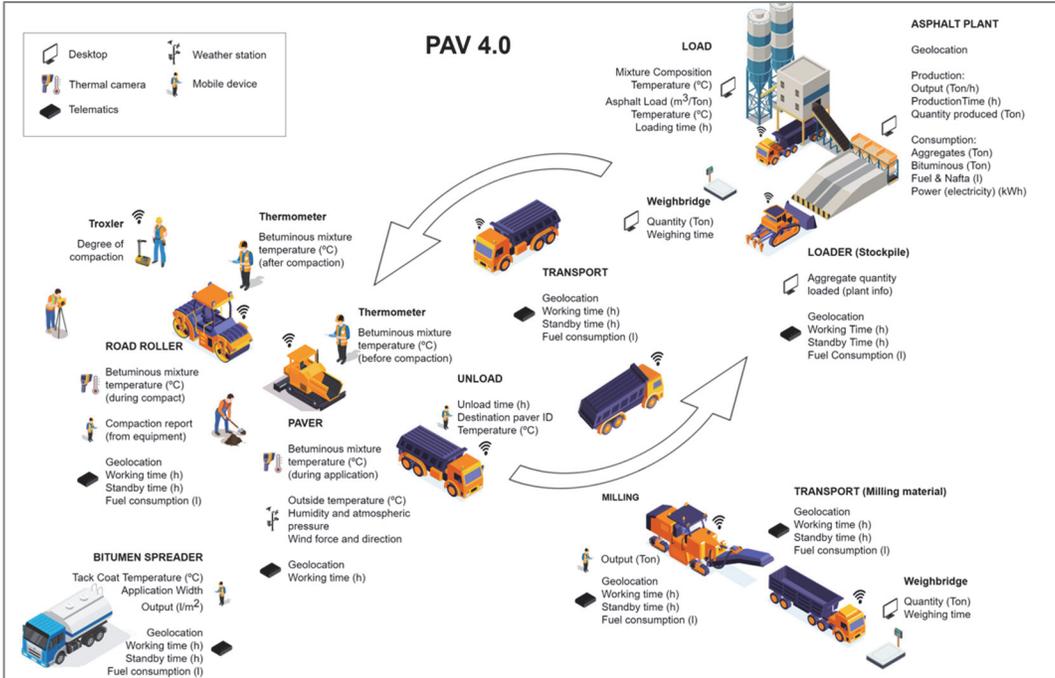


Fig. 15 – Esquema ilustrativo do projeto PAV4.0.



Fig. 16 – Protótipo do sensor de temperatura do pavimento.



Fig. 17 – Ilustração do protótipo da instalação do sensor de temperatura numa pavimentadora.

Com este dispositivo passa então a ser possível gravar 4 valores de temperatura do pavimento (aquando da pavimentação) por cada 40 a 50 cm de extensão pavimentada. Os dados são então enviados por Wi-Fi (dependendo do que estiver disponível como opção de ligação à internet) para uma infraestrutura própria que irá armazenar os dados e disponibilizar na aplicação PAV4.0, ilustrada na Figura 18, desenvolvida em ambiente *web* para permitir o seu uso em todo o tipo de dispositivos de forma ubíqua e pervasiva e que funciona de interface para todo o tipo de utilizadores com diferentes papéis e responsabilidades.

Conforme já referido, todos os dados capturados irão permitir monitorizar o processo em tempo real para efeitos de operação e controlo de qualidade. Contudo, uma das mais-valias desta solução é permitir realizar análise avançada de dados utilizando inteligência computacional e ciência de dados e, por exemplo, correlacionar a ocorrência de patologias de pavimento (que possam estar associadas à temperatura de aplicação da mistura betuminosa, ou a outras variáveis também gravadas no processo como a temperatura, humidade e outras). Como se percebe, por este caso de aplicação, as oportunidades da digitalização para o processo de pavimentação são imensas e variadas.

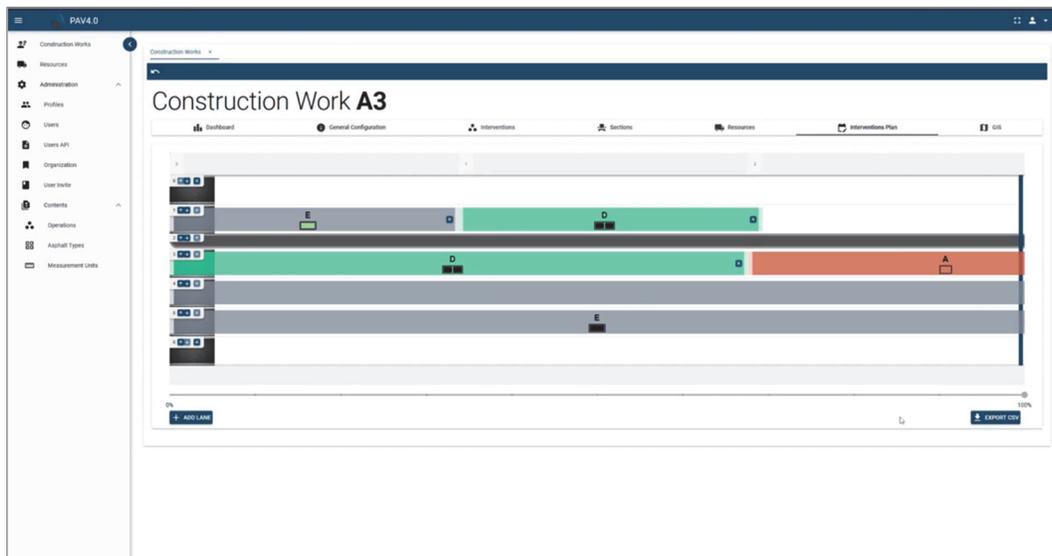


Fig. 18 – Ilustração de um ecrã da aplicação web PAV 4.0.

3.4 – Morfologia das partículas de agregado de balastro com aplicação à via-férrea

3.4.1 – Desenvolvimento de técnicas de digitalização

No âmbito da geotecnia nos transportes aplicada à ferrovia têm-se verificado vários desenvolvimentos e aplicações práticas de integração de novas tecnologias, desde a utilização de metodologias BIM, por exemplo na integração de diferentes sistemas das infraestruturas de transporte, e da utilização de *Digital Twins* no apoio ao faseamento construtivo, passando pela sensorização, aquisição e processamento de *Big Data*, recorrendo a ferramentas de Inteligência Artificial, ou ainda à construção e análise detalhada de modelos construídos com base em técnicas de radiometria.

Nesta secção são apresentadas, em linhas gerais, alguns estudos de aplicações de tecnologias de digitalização para a análise da morfologia de partículas de balastro ferroviário, recorrendo a técnicas de fotogrametria que têm vindo a ser desenvolvidos no LNEC, em colaboração com outras entidades.

A camada de balastro ferroviário é um dos principais componentes das vias-férrreas balastradas e, por esse motivo, este material é bastante controlado e deve obedecer a requisitos geométricos e mecânicos exigentes, estabelecidos em normativos específicos (CEN, 2002). Tradicionalmente, o balastro é constituído por agregado natural britado grosso, proveniente de rochas duras e sãs, cujas partículas apresentam dimensões entre 22 e 63 mm, e é colocado numa camada de cerca de 25-35 cm de espessura mínima, sob as travessas. Para uma maior estabilidade da camada e redução das forças de contato entre as partículas (através do aumento do número de pontos de contato), é desejável que as partículas tenham forma cúbica, faces rugosas e arestas vivas de forma a favorecer o imbricamento e evitar movimentos de rolamento ou de translação significativos. Neste contexto, a morfologia das partículas de balastro afeta especialmente o desempenho mecânico da camada, e da via-férrea como um todo, pelo que é importante caracterizá-la adequadamente e analisar os fatores que afetam a sua evolução, no que se refere ao desgaste e quebra das partículas (Guo et al., 2019).

Uma das principais linhas de investigação sobre a análise do ciclo de vida da via-férrea tem-se focado no estudo da influência da forma das partículas e dos parâmetros geométricos no comportamento da camada de balastro e na evolução da sua distribuição granulométrica (Tutumluer et al., 2006; Descantes et al., 2007; Indraratna et al., 2011; Le Pen et al., 2013; Moaveni et al., 2014; Nâlsund, 2014). Os recentes avanços computacionais, em termos de *hardware* e de ferramentas de simulação, têm promovido o desenvolvimento e a utilização mais frequente de modelos numéricos da via-férrea mais complexos, que recorrem, por exemplo, ao método de elementos discretos que exige um profundo conhecimento sobre a morfologia das partículas e da sua interação. Com estas ferramentas numéricas é possível analisar em maior detalhe os efeitos do tráfego e das ações mecânicas de manutenção (ataque de via) na evolução da forma das partículas, a estabilidade da camada e o comportamento dinâmico da via (Huang e Chrismer, 2013; Saussine et al., 2013; Tutumluer et al., 2013; Voivret et al., 2013; Ahmed et al., 2016; Chen e McDowell, 2016; Xu et al., 2021). Para esse objetivo, têm-se recorrido a diferentes abordagens para avaliar a morfologia das partículas de balastro, que se têm mostrado mais ou menos adequadas para este fim.

Embora os procedimentos de caracterização da morfologia das partículas previstos nas regulamentações em vigor estejam bem estabelecidos, estas especificam abordagens empíricas antigas e medições manuais, portanto sujeitas a erro humano (Folk, 1955). Uma análise grosseira da morfologia das partículas pode comprometer a qualidade dos resultados e conclusões dos estudos. É neste aspeto que a transição para o digital tem contribuído significativamente nos últimos anos, não só no que se refere à automatização e aquisição dos dados, mas também nas técnicas de processamento e análise dos mesmos.

Embora tenha havido diversos desenvolvimentos no que se refere a técnicas de caracterização da morfologia das partículas de agregados aplicados em infraestruturas de transportes, utilizando ferramentas de processamento automático de imagem, muitos destes ou se limitam apenas a análises bidimensionais (Zhao et al., 2020), ou não permitem a caracterização de partículas de dimensão

semelhante à do balastro ferroviário (Gates et al., 2011), ou são excessivamente dispendiosas e de difícil utilização (Deiros et al., 2019). Guo et al. (2019) apresentam uma revisão de literatura sobre estas e outras técnicas, comparando e evidenciando as vantagens e limitações de cada uma.

3.4.2 – Avaliação e validação recorrendo à fotogrametria

Estudos recentes no LNEC têm permitido o desenvolvimento de ferramentas mais acessíveis e expeditas, em termos de custo de equipamento e de *software*, de conhecimento e experiência necessários, bem como de esforço de processamento computacional, visando a reconstrução tridimensional de modelos digitais de objetos e respetiva análise de morfologia. A metodologia de reconstrução tridimensional (3D) de partículas de balastro consiste num processo de digitalização baseado em fotogrametria de curto alcance mais eficiente e de menor custo do que outros disponíveis. Utiliza *software* de acesso livre para a aplicação de algoritmos de *MultiView* e *Structure-from-Motion* e para o manuseamento das malhas 3D, conforme apresentado em Paixão et al. (2018). Entre os exemplos da aplicação, salientam-se não só os estudos sobre a morfologia de partículas de rocha natural (Jerónimo et al., 2020; Paixão et al., 2018) e artificial (Paixão e Fortunato, 2021) para balastro ferroviário, mas também estudos mais recentes sobre a rugosidade de discontinuidades rochosas (Paixão et al., 2022).

Entre as possíveis aplicações deste tipo de ferramentas de geração de modelos 3D de partículas de agregados para infraestruturas de transportes, encontram-se, entre outros: a caracterização do tamanho e da forma para verificação da conformidade; o estudo da evolução da morfologia das partículas resultante do desgaste e/ou fragmentação; e a criação uma base de dados de partículas digitais para alimentar bibliotecas de partículas destinadas à modelação por elementos discretos.

Os estudos iniciais focaram-se na validação da metodologia de digitalização por fotogrametria através da comparação das malhas tridimensionais de partículas de balastro obtidas por essa abordagem com as malhas geradas através de métodos bem estabelecidos no meio técnico-científico, nomeadamente, a tecnologia *laser scanning*. Os resultados obtidos sobre uma amostra de balastro constituído por 18 partículas foram bastante satisfatórios, no sentido em que a qualidade das malhas digitais foi comparável à das obtidas por *laser scanning*. É de notar que os desvios entre as malhas obtidas pelos dois métodos situaram-se, quase totalmente, no intervalo de $\pm 0,3$ mm (Figura 19a).

Em comparação com um método padrão de *laser scanning*, a abordagem por fotogrametria requer alguns conhecimentos básicos de fotografia por parte do operador, mas é muito menos exigente em termos de competência técnica e de recursos do que, por exemplo, a digitalização por tomografia computadorizada. A sessão de fotografia e as etapas de processamento são propensas ao processamento em lote e em paralelo, permitindo um rendimento de cerca de 2 partículas por hora.

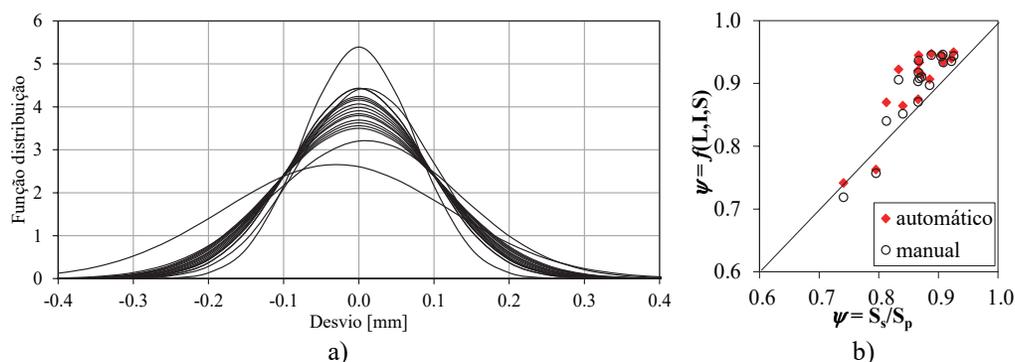


Fig. 19 – a) Curvas de distribuição dos desvios entre as malhas digitais de 18 partículas obtidas por fotogrametria e por *laser scanning*; b) esfericidade das partículas determinada de forma manual ou automática.

3.4.3 – Ferramentas de medição digital automática

No mesmo âmbito, foram desenvolvidas ferramentas de processamento e medição automática de vários parâmetros da morfologia das partículas, tais como, o volume, a área de superfície, as dimensões segundo os eixos maior (L), intermédio (I) e menor (S) (Krumbein, 1941), a esfericidade (Ψ), entre outros. Na Figura 19b é apresentada uma comparação entre os valores de esfericidade determinados segundo a expressão empírica formulada em função das dimensão L , I e S das partículas (Aschenbrenner, 1956), tal que $\Psi = f(L, I, S)$:

$$\Psi = \frac{12.8 \sqrt[3]{(S/I)^2(I/L)}}{1 + (S/I)(1 + (I/L)) + 6\sqrt{1 + (S/I)^2(1 + (I/L)^2)}} \quad (1)$$

e os determinados como a razão entre a área de uma esfera com volume idêntico ao da partícula (S_s) e a área da superfície dessa partícula (S_p) (Wadell, 1932): $\Psi = S_s/S_p$. É de notar que esta última formulação requer a determinação, não só da área da superfície da partícula, mas também do seu volume, que nesta era digital podem ser obtidos facilmente recorrendo às ferramentas tipicamente disponibilizadas por *software* de manuseamento de malhas 3D, mas em décadas anteriores seria de difícil determinação. Na Figura 19b são apresentados os valores determinados pela ferramenta de medição digital automática e os obtidos por medição “manual” dos parâmetros L , I e S , sobre as malhas digitais.

Estes resultados evidenciam não só que a medição manual pode introduzir erros apreciáveis, mas também que a determinação de parâmetros recorrendo a formulações empíricas (baseada em medições manuais que anteriormente eram possíveis e exequíveis, como L , I e S) e frequentemente utilizadas na classificação da morfologia de partículas (Blott e Pye, 2008), é muito redutora da tridimensionalidade das suas formas.

3.4.4 – Aplicação ao agregado de escória de siderurgia

Com o objetivo de analisar o desempenho e evidenciar as capacidades do agregado de escória de siderurgia (ASIC) como matéria-prima para balastro ferroviário e, assim, promover a incorporação deste subproduto da indústria e contribuir para o aumento da sustentabilidade do transporte ferroviário, no LNEC foi desenvolvido um estudo comparativo, com um agregado granítico natural, sobre a evolução da morfologia das partículas quando sujeitas ao ensaio de desgaste de Micro-Deval (ensaio a seco) (Paixão e Fortunato, 2021).

O estudo consistiu em submeter a ensaio uma amostra de cada um dos dois materiais, sendo que previamente se selecionou aleatoriamente um conjunto de 30 partículas de cada material. Recorrendo à metodologia de fotogrametria referida anteriormente, foram reconstruídas as malhas tridimensionais de cada uma dessas 60 partículas em três fases do ensaio: no início; após 2 mil revoluções do tambor; e no final do ensaio, após 14 mil revoluções.

Com as ferramentas de análise de morfologia desenvolvidas foi possível identificar, em cada partícula, as regiões de maior desgaste e/ou quebra e quantificar fisicamente essa evolução, conforme ilustrado na Figura 20. Foi também possível realizar um mapeamento dos valores do raio de aspereza (inverso da curvatura da superfície), tendo-se verificado uma boa correspondência entre esse parâmetro e o desgaste, tal como seria de esperar. Foram ainda aplicadas outras técnicas mais avançadas de análise morfológica que recorrem a funções harmónicas esféricas para caracterizar a evolução de parâmetros tridimensionais relativos à forma, à angularidade e à textura das partículas. Os resultados evidenciaram que as partículas de ASIC apresentaram maiores índices tridimensionais de angularidade e de textura superficial do que o granito natural, que são características desejáveis para agregado de balastro, no sentido de conferir resistência à camada e estabilidade à via-ferrea. As

partículas de ASIC retiveram essas características por mais tempo durante o ensaio e produziram desgaste superficial comparável ou inferior ao do granito.

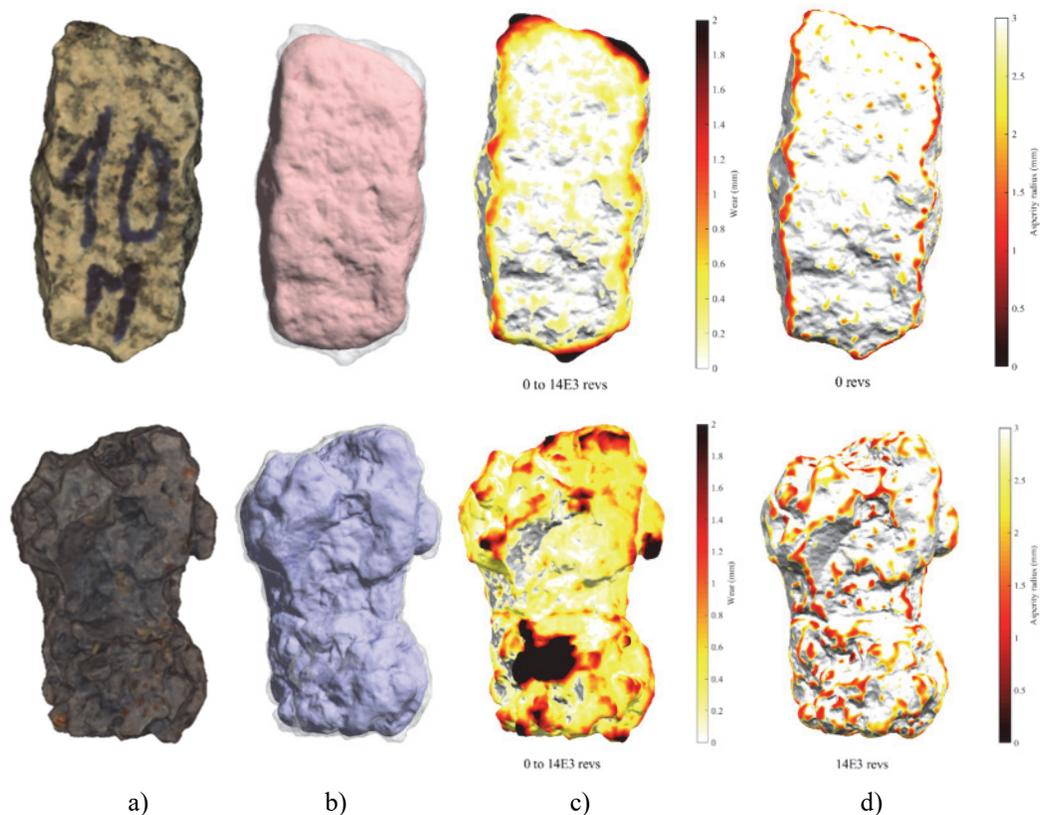


Fig. 20 – Resultados relativos a uma partícula de granito (em cima) e uma de ASIC (em baixo): a) aspeto da partícula; b) diferença entre o início e fim; c) desgaste superficial; d) raio de aspereza.

Estes resultados evidenciam o potencial que ASIC apresenta como um material alternativo de balastro, quando processados devidamente. Embora existam exemplos de aplicação deste material como balastro em alguns países, como no Brasil e nos E.U.A, a sua aplicação na Europa ainda está limitada. Assim, no atual paradigma de construção sustentável, considera-se oportuno desenvolver estudos envolvendo, por exemplo, a aplicação de ASIC em trechos experimentais de via-férrea, no sentido de demonstrar o desempenho deste material e consolidar a informação sobre o seu comportamento, eventualmente aplicando técnicas de caracterização baseadas em ferramentas digitais, como as aqui apresentadas.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) está cada vez mais comprometido com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pelas Nações Unidas (ONU). O contexto da Indústria 4.0 tem promovido o desenvolvimento de técnicas inovadoras da ciência dos materiais e da era digital com aplicação no setor da construção e, em particular, das infraestruturas de transporte. Com este artigo pretendeu-se demonstrar, com exemplos de aplicação em Portugal no âmbito da transição verde e da transformação digital, que a geotecnia pode igualmente dar, a par de outras especialidades, um contributo ativo e efetivo para a sustentabilidade e resiliência do setor,

nas várias fases do ciclo de vida das obras, nomeadamente no âmbito da gestão dos geomateriais, das terraplenagens, dos pavimentos rodoviários e aeroportuários e das vias-férreas.

No âmbito da transição verde, o artigo apresentou a utilização de materiais não convencionais e renováveis e o recurso a técnicas de estabilização baseadas na ativação alcalina de excedentes industriais. Em Portugal têm sido desenvolvidos importantes estudos sobre a aplicação de agregados reciclados em infraestrutura de transportes e que têm evidenciado o potencial de aplicação daquele tipo de agregados. As obras rodoviárias em curso no âmbito do PRR estão a ser exemplos dessa aplicação prática, nomeadamente de agregados reciclados de RCD, quer em misturas betuminosas quer em camadas granulares não ligadas (e.g., misturas betuminosas recuperadas), dando cumprimento ao Regime Geral de Gestão de Resíduos. O artigo descreveu também a utilização de excedentes industriais na estabilização de solos com uma significativa componente de cimentos alcalinos. Esta técnica de estabilização tem-se revelado bastante promissora não só para resolver o problema ambiental dos excedentes industriais, mas também pela possibilidade de substituir o cimento Portland de elevada pegada ecológica. Foi descrito um caso de estudo relacionado com a estabilização de camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. A importância desta nova abordagem para uma maior sustentabilidade e resiliência tem sido assumida pelas principais entidades gestoras das redes de infraestruturas de transporte. O artigo descreveu exemplos demonstrativos da metodologia que a Infraestruturas de Portugal tem vindo a implementar nas suas obras, quer ao nível de projeto quer na fase de construção.

Relativamente à transformação digital, foram apresentados os mais recentes desenvolvimentos relacionados com aplicações às terraplenagens, pavimentação rodoviária e via-férrea. No caso das terraplenagens, foi dado destaque aos sistemas de apoio à decisão. Foi descrito um caso de obra que permitiu fazer a demonstração da vantagem de utilizar um algoritmo de otimização, ao nível de planeamento e construção, para procurar a melhor solução de alocação de recursos. Em relação à pavimentação rodoviária, foram apresentados casos de otimização de processos, sensorização e monitorização de equipamentos e recolha de informação, aproveitando ao máximo o potencial da digitalização e, conseqüentemente, permitindo ganhos de eficiência e qualidade. No âmbito da ferrovia, com o exemplo da fotogrametria aplicada à morfologia das partículas de balastro, foi mais uma vez demonstrada a vantagem de utilizar tecnologias de digitalização.

É muito importante que no futuro se continue a criar condições que permitam às empresas do setor da AEC promover ainda mais a digitalização dos seus processos, ao nível de planeamento, construção e gestão da operação, com todas as vantagens daí inerentes do ponto de vista económico, ambiental e societal. Acredita-se também que será cada vez maior a implementação de técnicas construtivas comprometidas com os ODS. Neste esforço coletivo de implementação da transição eco-digital nas infraestruturas de transportes, a geotecnia continuará a ter um papel fundamental.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seguidamente os seus agradecimentos pelos seguintes apoios recebidos no âmbito das várias matérias abordadas no presente artigo:

- Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do financiamento UIDB/04625/2020 do CERIS (José Neves).
- Projeto PTDC/ECM/100931/2008 (SUPREMA – Aplicação Sustentável de Construção e Demolição Materiais Reciclados (RCD) em Infraestruturas Rodoviárias), financiado pela FCT, e do projeto be-READY (*REsilient roAD pavements for sustainabilITy*), financiado pela Islândia, Liechtenstein e Noruega através dos EEA Grants (Ana Cristina Freire, José Neves).
- Fundos Europeus Estruturais e de Investimento na componente FEDER, através do Programa Operacional para a Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) e do Programa Operacional Regional de Lisboa (ROP Lisboa) [Projeto n.º 046123; Referência do financiamento: POCI-01-0247-FEDER-046123 e LISBOA-01-0247-

FEDER-046123]. É também apoiado pelo programa de Recursos Humanos Altamente Qualificados [Referência de financiamento: NORTE-06-3559-FSE-000176] (João Moutinho, Manuel Parente).

- Siderurgia Nacional da Maia na disponibilização do material ASIC. O trabalho foi parcialmente financiado por Financiamento Base – UIDB/04708/2020 e por Financiamento Programático – UIDP/04708/2020, da Unidade de Investigação CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC) (André Paixão).
- Apoio parcial da FCT através de fundos nacionais (PIDDAC) sob a referência UIDB/04029/2020, e sob a referência LA/P/0112/2020 do Laboratório Associado "Laboratory Advanced Production and Intelligent Systems" ARISE sob a referência LA/P/0112/2020 (António Gomes Correia).
- Comissão Portuguesa de Geotecnia nos Transportes (CPGT), da Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG)

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmed, S.; Harkness, J.; Le Pen, L.; Powrie, W.; Zervos, A. (2016). *Numerical modelling of railway ballast at the particle scale*. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 40 (5), pp. 713-737, <https://doi.org/10.1002/nag.2424>.

Amândio, M.; Parente, M., Neves, J.; Fonseca, P. (2021). *Integration of smart pavement data with decision support systems: A Systematic Review*. Buildings, 11 (12), 579. <https://doi.org/10.3390/buildings11120579>.

Antunes, V.; Freire, A. C.; Neves, J. (2019). *A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling*. Construction and Building Materials, 211, pp. 453-469, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.258>.

Antunes, V.; Neves, J.; Freire, A. C. (2021). *Performance assessment of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in road surface mixtures*. Recycling, 6 (2), 32. <https://doi.org/10.3390/recycling6020032>.

ARRB (2022). *Best practice expert advice on the use of recycled materials in road and rail infrastructures: Part A. Technical Review an Assessment*. Commonwealth Sustainable Procurement Advocacy and Resource Centre. Department of Agriculture, Water, and the Environment.

Aschenbrenner, B. (1956). *A new method of expressing particle sphericity*. Journal of Sedimentary Research, 26 (1), pp. 15-31. <https://doi.org/10.1306/74D704A7-2B21-11D7-8648000102C1865D>.

Bilal, M.; Oyedele, L. O.; Qadir, J.; Munir, K.; Ajayi, S. O.; Akinade, O. O.; Owolabi, H. A.; Alaka, H. A.; Pasha, M. (2016). *Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends*. Advanced Engineering Informatics, 30 (3), pp. 500-521. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.07.001>.

Blott, S. J.; Pye, K. (2008). *Particle shape: a review and new methods of characterization and classification*. Sedimentology, 55 (1), pp. 31-63. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2007.00892.x>.

Cabaço, L.; Brás, H.; Motta, G. (2017). *Relatório nacional sobre a implementação da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. PORTUGAL*. Por ocasião da Apresentação Nacional

Voluntária no Fórum Político de Alto Nível das Nações Unidas. Ministério dos Negócios Estrangeiros.

CE (2023). *As prioridades da Comissão Europeia*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024_pt (consultado em 18/02/2023).

CEN (2002). *EN 13450 – Aggregates for railway ballast*. Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.

Chen, C.; McDowell, G. R. (2016). *An investigation of the dynamic behaviour of track transition zones using discrete element modelling*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 230 (1), pp. 117-128, <https://doi.org/10.1177/0954409714528892>.

Correa-Silva, M.; Rouainia, M.; Miranda, T.; Cristelo, N. (2021). *Predicting the mechanical behaviour of a sandy clay stabilised with an alkali-activated binder*. Engineering Geology, 292, 106260, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106260>.

Cristelo, N.; Fernández-Jiménez, A.; Vieira, C.; Miranda, T.; Palomo, A. (2018). *Stabilisation of construction and demolition waste with a high fines content using alkali activated fly ash*. Construction and Building Materials, 170, pp. 26-39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.057>.

Crucho, J.; Picado-Santos, L.; Neves, J. (2022). *Camadas de base e sub-base com misturas de agregados reciclados de betão tratadas com cimento e adição de fibra de coco*. 10º Congresso Rodoferroviário Português, Lisboa, Portugal.

Deiros, I.; Combe, G.; Emeriault, F.; Voivret, C.; Ferellec, J.-F. (2019). *X-ray CT analysis of the evolution of ballast grain morphology along a Micro-Deval test: key role of the asperity scale*. Granular Matter, 21 (30), <https://doi.org/10.1007/s10035-019-0881-y>.

Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; Meyarivan, T. (2002). *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*. IEEE Trans Evol Comput, 6, pp. 182–197.

Descantes, Y.; Russo, F.; Balabaud, J. M. (2007). *Angularity assessment of several railroad ballast sources using image processing*. Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials, Loizos, Scarpas, Al-Qadi (Eds.), 20-22 junho, p. 1809-1816, Athens, Greece, ISBN: 9780415448826.

EAPA (2023). *Asphalt in Figures 2021*. European Asphalt Pavement Association. <https://eapa.org/asphalt-in-figures> (consultado em 18/02/2023).

Elsamex (2014a). *Projeto de Execução dos Muros M14 e M24*. Autoestrada do Marão, A4/IP4 Amarante / Vila Real, Sublanço S3 – Nó de ligação ao IP4 / Nó de Campeã. Estradas de Portugal. Elsamex Portugal, Lisboa.

Elsamex (2014b). *Projeto de Execução dos Muros M40 e M41A*. Autoestrada do Marão, A4/IP4 Amarante / Vila Real, Sublanço S3 – Nó de ligação ao IP4 / Nó de Campeã. Estradas de Portugal. Elsamex Portugal, Lisboa.

European Commission (2001a). *ALT-MAT: Alternative materials in road construction*. Project Funded by European Commission under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme, Final Report for Publication, ALT-MAT Contract No.: RO-97-SC.2238.

European Commission (2011b). *Final Report Summary – DIRECT_MAT (DISmantling and RECycling Techniques for road MATerials – Sharing knowledge and practices)*. Funded by European commission under the Seventh Framework Programme (FP7).

- Fernandes, E. M.; Monteiro, B. P. B.; Antunes, P.; Ramalho, J.; Simões, J. P. (2016). *Execução e controlo da qualidade aplicado na construção de aterros em solo-cimento*. 15º Congresso Nacional de Geotecnia. Porto.
- Freire, A. C.; Neves, J. M.; Roque, A. J.; Martins, I. M.; Antunes, M. L. (2019). *Feasibility study of milled and crushed reclaimed asphalt pavement for application in unbound granular layers*. *Road Materials and Pavement Design*, 22 (7), pp- 1500-1520.
<https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1701539>.
- Folk, R. L. (1955). *Student operator error in determination of roundness, sphericity, and grain size*. *Journal of Sedimentary Research*, 25 (4), pp. 297-301.
<https://doi.org/10.1306/74D70493-2B21-11D7-8648000102C1865D>.
- Garcia-Lodeiro, I.; Cristelo, N.; Palomo, A.; Fernández-Jiménez, A. (2020). *Use of industrial by-products as alkaline cement activators*. *Construction and Building Materials*, 253, 119000,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119000>.
- Gates, L.; Masad, E.; Pyle, R.; Bushee, D. (2011). *Aggregate Image Measurement System 2 (AIMS2): Final Report*. Federal Highway Administration (FHWA), U.S. DoT, Washington DC, USA.
- Gomes Correia, A.; Magnan, J. P. (2012). *Trends and challenges in earthworks for transportation infrastructures*. *Advances in Transportation Geotechnics*, 2, pp. 1–12, ISBN: 9780415621359.
- Gomes Correia, A.; Neves, J.; Fortunato, E.; Parente, M. (2022). *A geotecnia nos pavimentos e vias-férreas e prospetivas para a era digital*. *Geotecnia*, 152, pp. 113-141
https://doi.org/10.14195/2184-8394_152_4.
- Gomes Correia, A.; Winter, M. G.; Puppala, A. J. (2016). *A review of sustainable approaches in transport infrastructure geotechnics*. *Transportation Geotechnics*, 7, pp. 21–28,
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.03.003>.
- Gomes Correia, A.; Ferreira, S.; Roque, A.; Cavalheiro, A. (2009). *Portuguese steel slags. A new geomaterial*. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering*, 1, pp. 15-18,
<https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-15>.
- Gomes Correia, A.; Roque, A.; Ferreira, S.; Fortunato, E. (2012). *Case study to promote the use of industrial byproducts: The Relevance of Performance Tests*. *Journal of ASTM International*. 9 (2), pp. 1-18,
<https://doi.org/10.1520/JAI103705>.
- Guo, Y.; Markine, V.; Zhang, X.; Qiang, W.; Jing, G. (2019). *Image analysis for morphology, rheology and degradation study of railway ballast: A review*. *Transportation Geotechnics*, 18, pp. 173-211,
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.12.001>.
- Hossain, M. U.; Ng, S. T.; Antwi-Afari, P.; Amor, B. (2020). *Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109948.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109948>.
- Huang, H.; Chrismer, S. (2013). *Discrete element modeling of ballast settlement under trains moving at "Critical Speeds"*. *Construction and Building Materials*, 38, pp. 994-1000,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.007>.
- Indraratna, B.; Salim, W.; Rujikiatkamjorn, C. (2011). *Advanced Rail Geotechnology – Ballasted Track*, 1ª edição, Taylor & Francis, London, UK, ISBN: 978-0-203-81577-9,
<https://doi.org/10.1201/b10861>.

- Jerónimo, P.; Resende, R.; Fortunato, E. (2020). *An assessment of contact and laser-based scanning of rock particles for railway ballast*. *Transportation Geotechnics*, 22, pp. 100302, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100302>.
- Kalman, B. et al. (2013). *Final Report Summary – Re-Road (End of Life Strategies of Asphalt Pavements)*. Funded by European commission under the Seventh Framework Programme (FP7).
- Krumbein, W. C. (1941). *Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles*. *Journal of Sedimentary Research*, 11 (2), pp. 64-72. <https://doi.org/10.1306/D42690F3-2B26-11D7-8648000102C1865D>.
- Le Pen, L. M.; Powrie, W.; Zervos, A.; Ahmed, S.; Aingaran, S. (2013). *Dependence of shape on particle size for a crushed rock railway ballast*. *Granular Matter*, 15 (6), pp. 849-861. <https://doi.org/10.1007/s10035-013-0437-5>.
- Marques, R.; Gomes Correia, A.; Cortez, P. (2008). *Data mining applied to compaction of geomaterials*. Eight International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Champaign, Illinois, USA.
- Miranda, T.; Leitão, D.; Oliveira, J.; Correa-Silva, M.; Araújo, N.; Coelho, J.; Fernández-Jiménez, A.; Cristelo, N. (2020). *Application of alkali-activated industrial wastes for the stabilisation of a full-scale (sub)base layer*. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118427. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118427>.
- Moaveni, M.; Qian, Y.; Boler, H.; Mishra, D.; Tutumluer, E. (2014). *Investigation of ballast degradation and fouling trends using image analysis*. 2nd International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance – Railways 2014, Pombo, J. (Ed.), 8-11 abril, Ajaccio, Corsica, France.
- Nålsund, R. (2014). *Railway ballast characteristics – Selection criteria and performance*. Tese de Doutorado, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Neves, J.; Martins, A.; Freire, A. C. (2016). *Catálogo de pavimentos com Resíduos de Construção e Demolição para estradas e arruamentos de baixo tráfego*. 8^o Congresso Rodoviário Português, Lisboa, Portugal.
- Neves, J.; Freire, A. C.; Qamhia, I.; Al-Qadi, I. L.; Tutumler, E. (2023). *Full-scale accelerated pavement testing and instrumentation*. In: Chastre, C., Neves, J., Ribeiro, D., Neves, M.G., Faria, P. (eds) *Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering*. Springer Tracts in Civil Engineering. Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-031-05875-2_7.
- Onishi, M.; Tatano, H.; Marcelo, D.; House, S.; Raina, A.; Shibuya, N.; Newman, J.; Imura, S. (2018). *Infrastructure prioritization incorporating resilience*. International Seminar on Disaster and Risk Management for Roads. November 7-8, 2018. Hanoi, Vietnam.
- Paixão, A.; Fortunato, E. (2021). *Abrasion evolution of steel furnace slag aggregate for railway ballast: 3D morphology analysis of scanned particles by close-range photogrammetry*. *Construction and Building Materials*, 267, 121225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121225>.
- Paixão, A.; Muralha, J.; Resende, R.; Fortunato, E. (2022). *Close-Range Photogrammetry for 3D Rock Joint Roughness Evaluation*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55 (6), pp. 3213-3233, <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02789-9>.

- Paixão, A.; Resende, R.; Fortunato, E. (2018). *Photogrammetry for digital reconstruction of railway ballast particles – A cost-efficient method*. Construction and Building Materials, 191, pp. 963-976, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.048>.
- Palomo, A.; Maltseva, O.; Garcia-Lodeiro, I.; Fernández-Jiménez, A. (2021). *Portland versus alkaline cement: Continuity or clean break: “A Key Decision for Global Sustainability”*. Frontiers in Chemistry, 9, 705475, <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.705475>.
- Parente, M.; Amândio, A.; Moutinho, J.; Gomes Correia, A. (2022). *Digital Twin optimization framework for earthworks production optimization and management*. Proceedings of the 11th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRRA2022), Trondheim, Norway.
- Parente, M.; Cortez, P.; Gomes Correia, A. (2015). *An evolutionary multi-objective optimization system for earthworks*. Expert Systems with Applications, 42 (19), pp. 6674-6685, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.04.051>.
- Parente, M.; Gomes Correia, A.; Cortez, P. (2014). *Use of Data Mining techniques in earthwork management: A case study*. Earthwork Project Management, Slope Stability Analysis, and Wave-Based Testing Techniques. American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication (GSP), 252, pp. 1-8, <https://doi.org/10.1061/9780784478523.001>.
- Parente, M.; Gomes Correia, A.; Figueira, G.; Mehra, A. (2018). *Towards improving earthworks production from an Industry 4.0 perspective: the role of remote information technologies and dynamic optimization techniques*. Proceedings of 7th Transport Research Arena (TRA 2018), Vienna, Austria.
- Pereira, G.; Parente, M.; Moutinho, J.; Sampaio, M. (2021). *Fuel consumption prediction for construction trucks: A noninvasive approach using dedicated sensors and machine learning*. Infrastructures, 6 (157), <https://doi.org/10.3390/infrastructures6110157>.
- PIARC (2021). *Increasing resilience of earth structures to natural hazards*. A PIARC literature review. Report 2021R04EN. Technical Committee 4.3 Earthworks. PIARC.
- Pomponi, F.; Moncaster, A. (2017). *Circular economy for the built environment: A research framework*. Journal of Cleaner Production, 143, pp. 710-718. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055>.
- Pourakbar, S.; Huat, B. (2017). *A review of alternatives traditional cementitious binders for engineering improvement of soils*. International Journal of Geotechnical Engineering, 11 (2), pp. 206-216, <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1207042>.
- Provis, J.; Van Deventer, J. (2014). *Alkali Activated Materials, State-Of-The-Art Report*. RILEM TC 224-AAM, first ed., Springer, Netherlands, <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>.
- PRR (2023). *Plano de Recuperação e Resiliência*. <https://recuperarportugal.gov.pt/#conteudo>
- Reis, G. S.; Quattrone, M.; Ambrós, W.; Cazacliu, B.; Sampaio, C. (2021). *Current applications of recycled aggregates from construction and demolition: A review*. Materials, 14, 1700, <https://doi.org/10.3390/ma14071700>.
- Sachs J.; Lafortune G.; Kroll C.; Fuller G.; Woelm F. (2022). *Sustainable Development Report 2022. From Crisis to Sustainable Development: the SDGs as Roadmap to 2030 and Beyond*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009210058>.
- SAMARIS (2004). *Literature review of recycling of by products in road construction in Europe. Deliverable 5 (SAM-06-DE05)*. Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure.

- Saussine, G.; Allain, E.; Vaillant, A.; Ribourg, M.; Neel, O. (2013). *High speed in extreme conditions: Ballast projection phenomenon*. International Workshop on Train Aerodynamics, 8-10 abril, Birmingham, UK.
- Shtayat, A.; Moridpour, S.; Best, B.; Shroff, A.; Raol, D. (2020). *A review of monitoring systems of pavement condition in paved and unpaved roads*. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 7 (5), pp. 629-638, <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.03.004>.
- Sousa, M. J. N.; Monteiro, B. P. B. (2009). *Do princípio do equilíbrio de materiais ao Plano de Gestão de Resíduos – Equívocos e benefícios*. Seminário Valorização de Resíduos em Obras Geotécnicas: Caracterização e Medidas para o Desenvolvimento do Sector. CT-VROG/SPG/UA, Aveiro.
- Tinoco, J.; Gomes Correia, A.; Cortez, P.; Toll, D. (2017). *Stability condition identification of rock and soil cutting slopes based on soft computing*. Journal of Computing in Civil Engineering, 32 (2), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000739](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000739).
- Tutumluer, E.; Huang, H.; Hashash, Y.; Ghataora, J. (2006). *Aggregate shape effects on ballast tamping and railroad. Track lateral stability*. Proceedings of the AREMA 2006 Annual Conference, Louisville, Kentucky, USA.
- Tutumluer, E.; Qian, Y.; Hashash, Y. M. A.; Ghaboussi, J.; Davis, D. D. (2013). *Discrete element modelling of ballasted track deformation behaviour*. International Journal of Rail Transportation, 1, pp. 57, <https://doi.org/10.1080/23248378.2013.788361>.
- UN (2023). *The 17 goals*. Department of Economics and Social Affairs. Sustainable Development <https://sdgs.un.org/goals> (consultado em 18/02/2023).
- UEPG (2022). *Sustainable Supply of Aggregates in Europe*. Final Report 12/2022.
- Vasenev, A.; Hartmann, T.; Dorée, A. (2014). *A distributed data collection and management framework for tracking construction operations*. Advanced Engineering Informatics, 28 (2), <https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.01.003>.
- Voivret, C.; Perales, R.; Saussine, G.; Costa D'aguiar, S.; Laurans, E.; Petit, P. (2013). *Multi-unit tamping machine: beyond the linear performance*. WCRR 2013 - World Congress on Railway Research, 25-28 Nov. 2013, Sydney, Australia.
- Wadell, H. C. (1932). *Volume, shape, and roundness of rock particles*. The Journal of Geology, 40 (5), pp. 443-451, <https://doi.org/10.1086/623964>.
- Xu, Y.; Yu, W.; Qie, L.; Wang, H.; Ning, N. (2021). *Analysis of influence of ballast shape on abrasion resistance using discrete element method*. Construction and Building Materials, 273, 121708, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121708>.
- Zhao, L.; Zhang, S.; Huang, D.; Wang, X. (2020). *A digitalized 2D particle database for statistical shape analysis and discrete modeling of rock aggregate*. Construction and Building Materials, 247, 117906, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117906>.

A CONQUISTA DO ESPAÇO SUBTERRÂNEO

The conquest of Underground Space

Raúl Sarra Pistone^{a,b}, João Gouveia^{a,c}, Nadir Plasencia^{a,d}, José Nuno Figueiredo^{a,d},
Gonçalo Diniz Vieira^{a,e}

^a Comissão Portuguesa de Túneis e do Espaço Subterrâneo, Portugal

^b COBA, Portugal

^c MAQUINTER, Portugal

^d EDP Produção, Portugal

^e CML - EPPGDL, Portugal

RESUMO – Neste documento agrega-se a informação partilhada na sessão de comemoração dos 50 anos da SPG e 75 anos do LNEC. Nesse evento pretendeu-se divulgar a organização da Comissão Portuguesa de Túneis e Espaço Subterrâneo (CPT), assim como os principais objetivos, atividades realizadas e constituição dos Grupos de Trabalho. Os coordenadores dos Grupos de Trabalho expuseram a situação das atividades em desenvolvimento em cada grupo – i) GT6 (Metodologias Construtivas: Métodos Convencional e Mecanizado nas Obras Subterrâneas); ii) GT5 (Investigação e Desenvolvimento – Ciclo de Vida das Obras); iii) GT4 (BIM e Gestão da Informação nos Túneis e nas Obras Subterrâneas) e iv) GT2 (Engenharia e Legislação: Práticas Contratuais).

ABSTRACT – This document aggregates the information shared in the session celebrating the 50 years of the SPG and 75 years of the LNEC. In this event it was intended to publicize the organization of the Portuguese Commission of Tunnels and Underground Space (CPT), as well as the main objectives, activities and composition of the Working Groups. The coordinators of the Working Groups presented the situation of the activities under development in each group; i) GT6 (Construction Methodologies: Conventional and Mechanized Methods in Underground Works); ii) GT5 (Research and Development – Life Cycle of Works); iii) GT4 (BIM and Information Management in Tunnels and Underground Works) and iv) GT2 (Engineering and Legislation: Contractual Practices)

Palavras Chave – túneis, espaço subterrâneo, CPT.

Keywords – tunnels, underground space, CPT.

1 – INTRODUÇÃO

Faz-se uso do espaço subterrâneo desde tempos imemorráveis, mas a utilização planificada, eficiente e respeitosa desse espaço é uma atividade atual, em pleno desenvolvimento.

Sobre esta matéria, há pelo menos duas questões cujas respostas têm merecido muita atenção dos vários setores envolvidos na problemática da utilização do subsolo: “O Porquê?” e “O Como?”. Ambas questões são objeto de interesse e empenho da CPT.

Os túneis aproximam pessoas, encurtam distâncias, transpõem obstáculos, poupam vidas tornando as estradas e as vias férreas mais seguras, facilitam os transportes públicos nos grandes núcleos urbanos.

E-mails: r.pistone@cobagroup.com (R. Pistone), jgouveia@maqpor.pt (J. Gouveia), nadir.plasencia@edp.com (N. Plasencia), josenuo.figueiredo@edp.com (J. Figueiredo), goncalo.diniz.vieira@cm-lisboa.pt (G. Vieira)

Os túneis rodoviários e os ferroviários contribuem para resolver problemas de traçado e de atravessamento de relevos montanhosos, contribuindo para a economia, a segurança e o conforto do transporte. Os túneis também são uma opção importante nas travessias de rios, estreitos e zonas portuárias, como deverá acontecer, mais tarde ou mais cedo, com as novas travessias do estuário do Tejo, por exemplo.

São amigos do ambiente e melhoram a qualidade de vida das cidades, distribuem água potável e recolhem as águas sujas, potenciam o aproveitamento da energia hídrica. Uma razão muito importante para usar o espaço subterrâneo prende-se com a necessidade de criar espaços com um alto nível de isolamento. O terreno é maciço e opaco e oferece diversas vantagens em termos de isolamento, proteção e contenção relativamente a fenómenos climáticos, desastres naturais e terremotos.

Particularmente nas cidades modernas, são muito fortes as razões sociais para recorrer ao espaço subterrâneo, cada vez mais utilizado para instalar sistemas de transporte urbano seguros, ambientalmente corretos, rápidos e discretos. Os túneis de tráfego urbano, ao retirarem tráfego das ruas, reduzem o ruído, permitem uma melhor gestão da poluição do ar e as áreas das ruas possibilitam serem parcialmente ou totalmente utilizadas para outros fins socialmente mais nobres. O caso paradigmático do Túnel do Marquês constitui um exemplo em relação ao qual é consensual a vantagem ambiental decorrente da sua existência.

Muitas cidades, incluindo Lisboa, já decidiram executar túneis para mitigar o risco de cheias e inundações. Uma vez que as áreas de absorção das águas pluviais foram ficando reduzidas devido ao avanço da urbanização, as bacias hidrográficas devem ser convenientemente drenadas, nestes casos com recurso a túneis de drenagem.

2 – COMISSÃO PORTUGUESA DE TÚNEIS E DO ESPAÇO SUBTERRÂNEO (CPT)

2.1 – Objetivo

A Comissão Portuguesa de Túneis e do Espaço Subterrâneo (CPT) é um agrupamento de profissionais e empresas ligadas ao setor das obras subterrâneas, integrado na Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG). Constitui o grupo nacional que representa Portugal, por delegação da SPG, como País membro da *International Tunnelling and Underground Space Association* (ITA-AITES).

Com a criação da Comissão Portuguesa de Túneis em 2006, a necessidade de realizar um cadastro de túneis e obras subterrâneas em Portugal foi identificada, desde o início, como um objetivo fundamental. Esta ideia mereceu o melhor apoio do Conselho Diretivo da ITA, reunido em Lisboa em junho do mesmo ano.

A CPT, trabalhou arduamente neste projeto durante vários anos, para apresentar à comunidade nacional e internacional as atividades de construção de túneis e desenvolvimento do espaço subterrâneo no país.

2.2 – Grupos de Trabalho

O trabalho técnico-científico da CPT é desenvolvido nos Grupos de Trabalho. Na atualidade são sete os GTs em funcionamento e está em preparação um grupo sobre Projeto Sustentável de Obras Subterrâneas. No total, colaboram cerca de meia centena de colegas experientes e interessados no desenvolvimento das diferentes matérias abordadas nos GTs, consideradas cruciais para a consolidação da tecnologia especializada no país. Estes grupos constituem também o elo de ligação que permite a circulação da informação em ambos sentidos com os grupos homónimos da ITA e do foro europeu *European Underground & Tunnel Forum* (EUTF).

Os Grupos de Trabalho atualmente existentes são os seguintes:

- GT1 - Registo de Túneis e Obras Subterrâneas realizadas em Portugal | Coordenador: Raul Pistone

- GT2 - Engenharia e Legislação: Práticas Contratuais | Coordenador: Gonçalo Diniz Vieira | Espelho do WG3 da ITA (Contractual Practices)
- GT3 - Segurança e Saúde | Coordenador: Manuel Tender | Espelho do WG5 da ITA (Health and Safety in Works)
- GT4 - BIM e Gestão da Informação nos Túneis e nas Obras Subterrâneas | Coordenador: José Nuno Figueiredo | Tutor: Gonçalo Diniz Vieira | Espelho do WG22 da ITA (Information Modelling in Tunnelling)
- GT5 - Investigação e Desenvolvimento – Ciclo de Vida das Obras | Espelho do WG2 (Research) e do WG 21 (Life Cycle Asset Management) da ITA | Coordenador: Nadir Plasencia | Consultores: Jorge Almeida e Sousa e Raúl Pistone
- GT6 - Metodologias Construtivas: Métodos Convencional e Mecanizado nas Obras Subterrâneas | Espelho do WG19 (Conventional Tunnelling), do WG14 (Mechanized Tunnelling), e do WG 23 (Design and Construction of Shafts) da ITA | Coordenador: João Gouveia | Tutor: Raúl Pistone
- CPT - Young Members | Espelho do grupo YM da ITA | Coordenador: Luís Miranda

2.3 – Publicações

A CPT produziu muitas publicações tanto como entidade coletiva quanto como contribuição individual de seus membros.

Túneis em Portugal. Pelo trabalho conjunto empenhado no seu desenvolvimento, bem como pelo impacto na comunidade profissional nacional e internacional, cita-se o livro *Túneis em Portugal*, editado por Raúl Sarra Pistone e António Pinto da Cunha em 2014 (Figura 1). O livro está disponível em versão papel com capa dura, para coleção de biblioteca, podendo também ser consultado na íntegra na página web da CPT (Pistone e Pinto da Cunha, 2014).



Fig. 1 – Publicações da CPT: Capas das edições do livro “Túneis em Portugal”, do “Guia de Boas Práticas de Segurança e Saúde para a Fase de Construção de Obras Subterrâneas” e do “Guia de Boas Práticas para a Contratação de Obras Geotécnicas Complexas” (Pistone e Pinto da Cunha, 2014; CPT, 2022; OE-CPT-APPC, 2020)

Guia de Boas Práticas de Segurança e Saúde para a Fase de Construção de Obras Subterrâneas, elaborado pelo Grupo de Trabalho 3 – Segurança e Saúde nas Obras Subterrâneas, publicação que visa o enquadramento legislativo sobre segurança e saúde em obras subterrâneas

(Figura 1). Publicado em fevereiro de 2022 e cuja versão integral pode ser consultada na página web da CPT (CPT, 2022).

Guia de Boas Práticas para a Contratação de Obras Geotécnicas Complexas. No seguimento da Jornada de Estudos CPT sobre Contratação de Obras Geotécnicas Complexas (OGC), ocorrida em fevereiro de 2018 no LNEC, foi constituído o grupo de trabalho responsável pela elaboração deste Guia de Boas Práticas, integrado pela CPT, a Associação Portuguesa de Projectistas e Consultores (APPC) e a Ordem dos Engenheiros (OE) Este grupo teve por objetivo propor uma metodologia de contratação de obras geotécnicas complexas à luz da redação atual do Código dos Contratos Públicos, da qual resultou o presente documento (Figura 1), publicado pelo Instituto dos Mercados Públicos, do Imobiliário e da Construção (IMPIC) em 2021 como Manual de Boas Práticas. Pode ser consultado na página web do IMPIC assim como na página da CPT (OE-CPT-APPC, 2020).

2.4 – Organização de eventos técnicos

Desde a sua fundação, o CPT organizou muitos e variados eventos de divulgação e formação, como seminários nacionais e internacionais, reuniões de especialidade, conferências sobre temas específicos. Nos últimos anos, podem-se mencionar:

Os webinars sobre *Projeto de Obras Geotécnicas Complexas*, em julho de 2021, e sobre *Betão projetado nas Obras Subterrâneas*, evento, organizado pelo GT6 da CPT, em setembro de 2021, ambos disponíveis no canal YouTube da SPG.

Espaço Subterrâneo: Conversas e Experiências no Feminino, com a participação de colegas das várias entidades do ensino e da indústria das Obras Subterrâneas, realizado no dia 7 de março de 2022.

Curso de Introdução à Prática em Obras Subterrâneas. Módulo 1 – Métodos Mecanizados na Construção de Obras Subterrâneas, em junho de 2022, organizado com o apoio da FUNDEC.

2.5 – Forum Europeu de Túneis e Obras Subterrâneas – EUTF

Das atividades de integração com os países vizinhos realizadas pela CPT, merece especial destaque a participação no *European Underground & Tunnelling Forum EUTF* (Figura 2). Este fórum foi criado na reunião de Lisboa de outubro de 2019, integrado pelos oito países presentes: Bélgica, Espanha, França, Itália, Portugal, Suíça, Alemanha e Áustria. Ainda no ano de 2019 foi admitida a associação holandesa de túneis (TTOW/KIVI), completando o grupo de nove países integrantes. Os representantes da CPT na direção do EUTF são os Eng^{os} Raúl Sarra Pistone e João Bilé Serra. O Eng^o Luís Miranda representa a CPT no *Young Members Group*. No *Steering Committee BIM* a CPT está representada pelos Eng^{os}. Gonçalo Diniz Vieira e José Nuno Figueiredo. No grupo de trabalho *Predictive Maintenance and Refurbishment* a representação está a cargo da Dra. Nadir Plasencia.



Fig. 2 – Mesa redonda do EUTF organizada pela Associação Francesa – AFTES, 2021.

2.6 – Visitas Técnicas

Entre as visitas técnicas mais memoráveis organizadas pela CPT citam-se as mais recentes realizadas aos túneis de Águas Santas e Marão (Figuras 3 e 4), em 2017, e às obras hidroelétricas do Alto Tâmega, em 2019 (Figura 5).



Fig. 3 - Visita aos Túneis de Águas Santas – A4.



Fig. 4 - Visita ao Túnel do Marão.

OBRAS DO SISTEMA ELETROPRODUTOR DO TÂMEGA
Visita Técnica CPT | 22 de maio de 2019

PROGRAMA

07:00 Saída de Lisboa, Estação Oriente (CPT, comboio AP 131)
09:00 Parada de autocarro, Estação de Cascais
11:30 Apresentação geral das obras (Bardadej) 12:30 Visita panorâmica do projeto desde a diâmetro de aquisição de Gavieses 13:00 Alentejo
14:30 Visita técnica à obra em construção (Bardadej) 15:00 Regresso a Lisboa, comboio AP 131

INSCRIÇÃO

Por convite/diretório para a sociedade de SPG

Titular	Preço
Sócios SPG/Membros CPE	€ 65,00*
Sócios não associados	€ 80,00*
Estudantes	€ 75,00*

*No caso de não incluir o bilhete de comboio o valor de inscrição será reduzido em 25€

SECRETARIADO

Comiss. Local
SPG-A-LNEC
Av. do Brasil 101 - 1700-060 Lisboa - PT
tel. 21 444 80 90 e-mail: ggg@lnece.pt
IBAN: PT60 0312 0107 0000 4777 0300 1

Fig. 5 - Visita às obras do Alto Tâmega.

3 – OBRAS EM CURSO

3.1 – Projetos em Curso

Atualmente, à data de redação do presente artigo, existem cinco projetos subterrâneos urbanos em curso, localizados nas cidades de Lisboa e do Porto. Estes projetos são os seguintes: a) dois projetos integrados no Plano de Expansão da rede do Metropolitano de Lisboa para o prolongamento

das linhas Amarela e Verde – Rato/Cais do Sodré, dividido em dois Lotes: Lote 1: Rato – Santos e Lote 2: Santos - Cais do Sodré (Figura 6); b) dois projetos integrados no Plano de Expansão da rede de Metro do Porto (Figura 7): Construção da Linha Circular (Linha Rosa), Aliados/Praça da Liberdade – Casa da Música/Boavista e Prolongamento da Linha Amarela (Santo Ovídio - Vila D’Este); e c) o Plano Geral de Drenagem de Lisboa (PGDL), da Câmara Municipal de Lisboa (Figura 8).



Fig. 6 – Plano de Expansão da rede do Metropolitano de Lisboa.



Fig. 7 – Plano de Expansão da rede de Metro do Porto.



Fig. 8 – Plano Geral de Drenagem de Lisboa.

3.2 – Plano de Expansão da rede do Metropolitano de Lisboa para o prolongamento das linhas Amarela e Verde – Rato/Cais do Sodré

O Plano de Expansão da rede do Metropolitano de Lisboa para o prolongamento das linhas Amarela e Verde desenvolve-se entre a Estação do Rato e a Estação do Cais do Sodré (Figura 9). Está dividida em dois lotes, o primeiro entre a Estação do Rato e o início da Estação de Santos, incluindo a construção de dois poços de ventilação (PV208 e PV213) e a estação da Estrela, e o segundo com início na Estação de Santos (incluindo a sua construção) e fim na Estação do Cais do Sodré. Os túneis construídos em NATM-Método Convencional e a céu aberto terão um comprimento de cerca de 2 km.

Apresentam-se alguns dados contratuais sobre os dois lotes:

- O Lote 1 consiste na Empreitada de projeto e construção dos toscos, respeitante à construção entre o término da estação Rato e a estação Santos. O contrato foi celebrado em maio de 2020 com a ZAGOPE, pelo valor de 48,6 milhões de euros.
- O Lote 2 engloba a empreitada de projeto e construção dos toscos entre a estação Santos e o término da estação Cais do Sodré. Este contrato foi assinado em setembro de 2020 com o agrupamento constituído pelas sociedades Mota Engil, Engenharia e Construção, S.A. e SPIE Batignolles International. O projeto tem o valor de 73,5 milhões de euros.

3.3 – Plano de Expansão da rede do Metro do Porto

3.3.1 – Construção da Linha Circular (Linha Rosa), Aliados/Praça da Liberdade – Casa da Música/Boavista

A Linha Circular (Linha Rosa) desenvolve-se entre a Estação da Casa da Música/Boavista e a Estação dos Aliados/Praça da Liberdade, ao longo de 3,2 km de extensão e inclui a construção de quatro estações subterrâneas (Liberdade/S.Bento, Hospital de St. António, Galiza e Boavista/Casa da Música), três poços de ventilação (PEV1, PEV2 e PEV3) e o desvio do Rio de Vila (Figura 10).

Esta empreitada, para a construção da Linha Rosa, entre S. Bento e a Casa da Música, no Porto, foi adjudicada ao consórcio Ferrovia/ACA pelo valor de 189 milhões de euros em novembro 2020.



Fig. 9 – Obras iniciadas no Metropolitano de Lisboa.



Fig. 10 – Traçado da Linha Rosa do Metro do Porto.

3.3.2 – Construção da Prolongamento da Linha Amarela (Santo Ovídio - Vila D’Este)

A Construção do Prolongamento da Linha Amarela entre as estações de Santo Ovídio e Vila D’Este inclui uma extensão de 3,2 km em Via Dupla, um canal misto de desenvolvimento aéreo, enterrado e em superfície, três novas estações – Manuel Leão / Hospital Santos Silva e Vila D’Este, um Poço de Ventilação e Emergência (PVE) e um Parque de Material junto ao término em Vila D’Este.

O Metro do Porto adjudicou este projeto, o prolongamento da linha Amarela entre Santo Ovídeo a Vila d’ Este, em Vila Nova de Gaia, ao consórcio Ferrovia/ACA em novembro de 2020 pelo valor de 98,9 milhões de euros. Nas Figuras 11 e 12 podem ser observadas fotos das obras em curso.

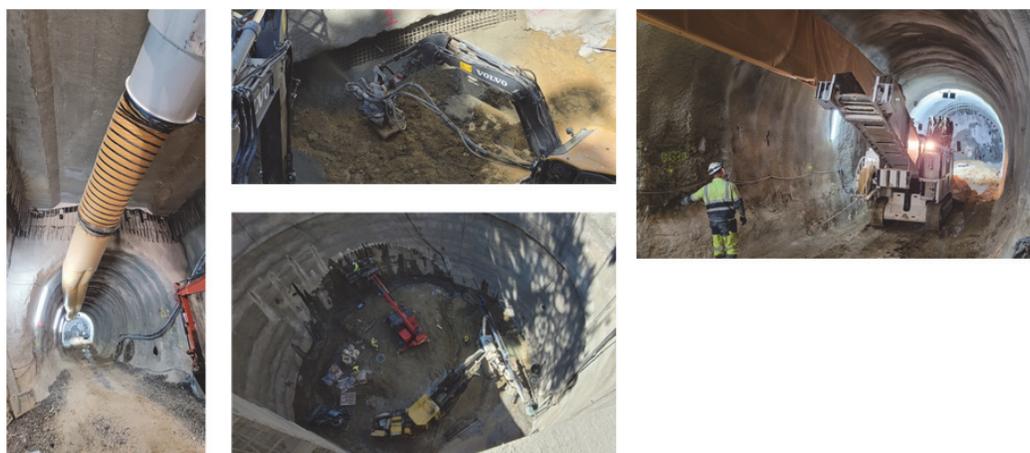


Fig. 11 – Obras no Metro do Porto.



Fig. 12 – Prolongamento da Linha Amarela (Santo Ovídeo - Linha D’Este).

3.4 – PGDL – Plano Geral de Drenagem de Lisboa, da Camara Municipal de Lisboa

O PGDL – Plano Geral de Drenagem de Lisboa inclui a construção de dois túneis com 5,5 m de diâmetro interno. O primeiro será o túnel Monsanto-Santa Apolónia (TMSA) e o segundo o túnel Chelas-Beato (TCB). O túnel Monsanto-Santa Apolónia tem cerca de 5 km de extensão e o túnel Chelas-Beato cerca de 1 km. A escavação destes túneis será realizada por uma Tuneladora TBM

EPB construída pela CREG-WIRTH com um diâmetro de corte de 6410 mm e batizada por H2Oli (Figura 13).

O Contrato deste projeto foi celebrado entre a Câmara Municipal de Lisboa e o consórcio Mota Engil / SPIE Batignolles Internacional em 28 abril 2021 pelo valor de 132.900.000€ e um prazo de 1.140 dias (cerca de 3 anos e meio).

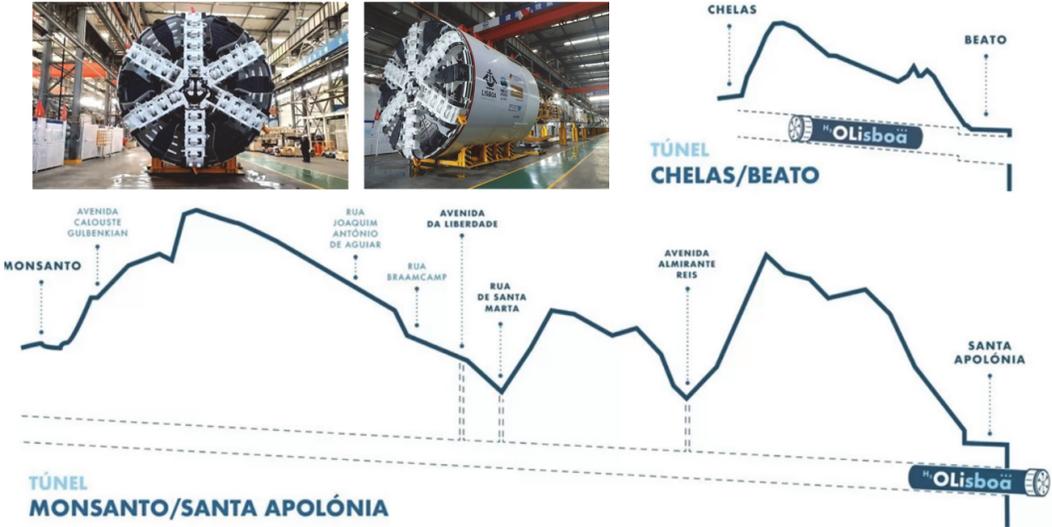


Fig. 13 – TBM para o PGDL.

4 – CICLO DE VIDA – GESTÃO DE ATIVOS

4.1 – Manutenção Preventiva de Túneis

A CPT tem vindo a participar em 3 grupos de trabalho internacionais onde se endereçam temas de investigação, inspeção, manutenção e reparação numa ótica de gestão de ativos. Esses grupos de trabalho, integrados na ITA- *International Tunneling Association*, designam-se por *WG2-Research*, *WG6- Maintenance and Repair*, *WG21-Life Span Asset Management*.

Com a criação da EUTF – *European Underground and Tunnel Forum* (em 2019), cujo objetivo principal é a partilha de conhecimento europeu sobre espaços subterrâneos, surgiu a proposta da

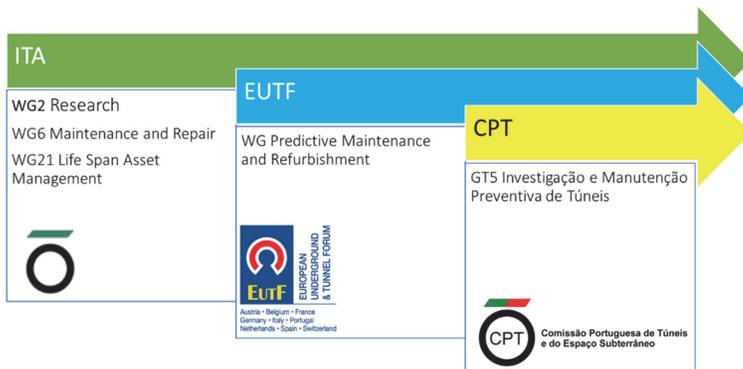


Fig. 14– Relação entre os grupos de trabalho da ITA, EUTF e CPT

criação de grupos de trabalhos. Em 2021 era criado o *WG-Predictive Maintenance and Refurbishment*, em paralelo com a criação do grupo BIM.

Em Portugal, integrado na Comissão Portuguesa de Túneis e Espaço Subterrâneo, está a ser dinamizado o Grupo de Trabalho 5 – Investigação e Manutenção Preventiva de Túneis.

A Figura 14 representa a interligação dos diversos grupos de trabalho da ITA, EUTF e CPT.

Até ao momento, têm colaborado no GT5 da CPT representantes da Brisa, EDP, Infraestruturas de Portugal e Metro do Porto. Este grupo tem a expectativa de que se venham a juntar representantes do Metropolitano de Lisboa e Túneis da Madeira. Os representantes destas empresas têm acesso a toda a informação partilhada pelo *WG Predictive Maintenance and Refurbishment* da EUTF.

4.2 – Objetivos do *WG Predictive Maintenance and Refurbishment*

Partindo duma situação europeia com um conjunto significativo de ativos subterrâneos envelhecidos (Figura 15) e a necessitar de intervenções, a criação deste grupo de trabalho foi alicerçada num conjunto fundamental de objetivos:

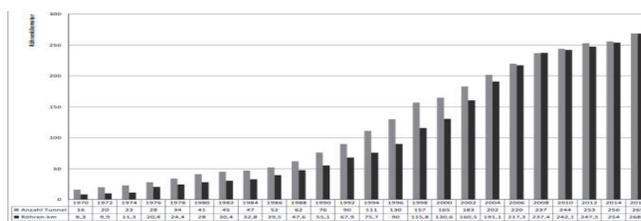
- Partilha de conhecimentos sobre projetos de reabilitação
- Partilha de experiências sobre investigação e desenvolvimentos na área da manutenção preventiva e reabilitação
- Ser inspirado pelas experiências dos outros
- Preocupação: manter operacionais os túneis antigos
- Os túneis devem ser estruturas fiáveis

Entretanto, a discussão no seio do grupo permitiu verificar que, globalmente, os diversos países partilham a mesma perspetiva sobre os desafios no campo da manutenção preventiva e reabilitação, concluindo-se, genericamente, que a construção de túneis pela Europa foi relativamente rápida (Figura16), que nesses túneis o trânsito, nomeadamente de pesados, se foi intensificando

- European countries have an increasing network of aging tunnels



Fig. 15 – Envelhecimento dos espaços subterrâneos europeus tem evidenciado a necessidade de definir planos de manutenção



Source of graphics: Presentation of Germany STUVA-Sachstandsbericht 2017 – Instandsetzungsstrategien von Verkehrstunneln

Fig. 16 – Evolução do investimento na construção de túneis de 1970 a 2016 na Alemanha.

gradualmente, acelerando o envelhecimento das estruturas, sendo exigente e urgente a sua manutenção.

4.3 – Inspeção e manutenção de túneis na Europa

As diversas reuniões de trabalho levaram o grupo a diversas constatações. Verifica-se, por exemplo, que dificilmente os gestores destes ativos alocam verbas anuais fundamentadas para a manutenção estrutural dos túneis. Efetivamente nem todos os países da Europa têm orçamentos específicos para manutenção dos túneis. Uma das questões que se coloca é se a gestão inadequada destes ativos tem levado ao fecho de algumas destas estruturas.

Do ponto de vista das metodologias de inspeção tem-se verificado o recurso à DIN 1076, utilizada para outras estruturas de engenharia civil, mais ou menos adaptada a estruturas subterrâneas (Figura 17).

Inspection code "		DIN 1076"				
Condition grade	Area/zone	Condition assessment	every 2 yr			
			load capacity	usability	durability	damage
1	1.0-1.4	very good condition	+	+	+	none to small
	1.5-1.9	good condition				none to small
2	2.0-2.4	satisfactory condition	+	+	0	none to small
	2.5-2.9	sufficient condition				none to small
3-4	3.0-3.4	not sufficient condition	+	0	0	medium - serious
	3.5-4.0	inadequate condition	-	-	-	very serious

Fig. 17 – Classificação para inspeção de infraestruturas (DIN 1076); a realizar a cada 2 anos.

Será que esta é a abordagem adequada para estas estruturas subterrâneas? Será que se está a conseguir realçar adequadamente a evolução das patologias destas estruturas? Classificar e hierarquizar os túneis em termos de necessidade de intervenção? Será que para essa sistematização, orçamento de intervenções e definição de estratégia de gestão está a ser considerada uma inspeção sistemática?



Fig. 18 – Critérios de manutenção preventiva.

Frequentemente, para túneis muito longos, verifica-se que tem sido implementada, após construção, uma gestão de manutenção preventiva corrente. No entanto, isso não tem evitado a necessidade de, ao fim de certo período, o túnel ser sujeito a um projeto de reabilitação. A manutenção preventiva será a solução? Como tem sido implementada nos diversos países? Como estarão a ser implementados os planos de inspeção na manutenção? (Figura 18)

4.4 – Planos de Inspeção na Manutenção: Desenvolvimentos e Inovação

Uma das conclusões do WG é que um plano de inspeção dos túneis é fundamental para a manutenção preventiva sendo que existem desafios técnicos comuns a outras estruturas, tais como:

- Deterioração de betões, carbonatação, penetração de cloretos, corrosão de armaduras,
- Gestão e prevenção de infiltrações,
- Colmatação de drenagem.

Mas também desafios específicos (Figura 19):

- Selagem de juntas submersas,
- Deformações,
- Gestão e Prevenção de infiltrações em juntas seladas,
- Degradação do terreno envolvente.



Fig. 19 – Patologias em obras subterrâneas.

O desenvolvimento de técnicas de inspeção, de reparação de betões, de técnicas de selagem, com pouco impacto na operação, assim como o desenvolvimento de materiais específicos para reparações, ou até os processos de digitalização (modelos 3D e gémeos digitais para operação), estão a ser acompanhados por este grupo de trabalho, pois considera-se que estes desenvolvimentos estão a contribuir também para o desenvolvimento de metodologias de inspeção para a manutenção preventiva das obras subterrâneas.

4.5 – Critérios de Inspeção e Registo: Guias e Standards

Tendo por base os procedimentos implementados nos diversos países da EUTF para inspeção de túneis, o WG tem o objetivo de elaborar um “Regulations/Guidelines for European tunnel structural inspections“. Representantes da Brisa, EDP, Infraestruturas de Portugal e Metro do Porto têm estado atualmente a juntar, num único documento, os procedimentos implementados em Portugal por estas empresas. O objetivo é a partilha desta informação com a EUTF, como procedimentos portugueses, de modo a garantir que os nossos procedimentos sejam considerados num guia europeu (Figura 20).

No âmbito do WG da EUTF foram partilhados documentos com os critérios de inspeção e registo de patologias utilizados em países europeus como Espanha e Suíça (Figura 21).

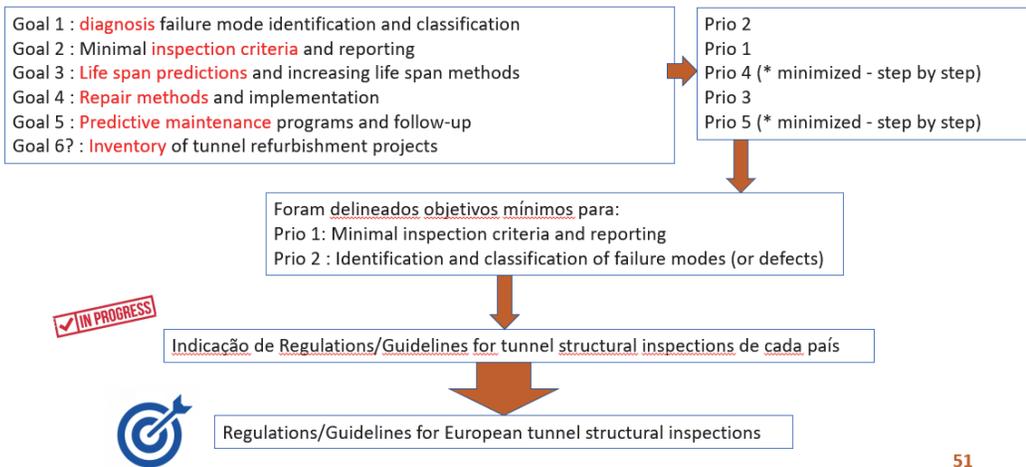


Fig. 20 – Definidos e priorizados os objetivos do WG da EUTF. O papel do GT5 da CPT.

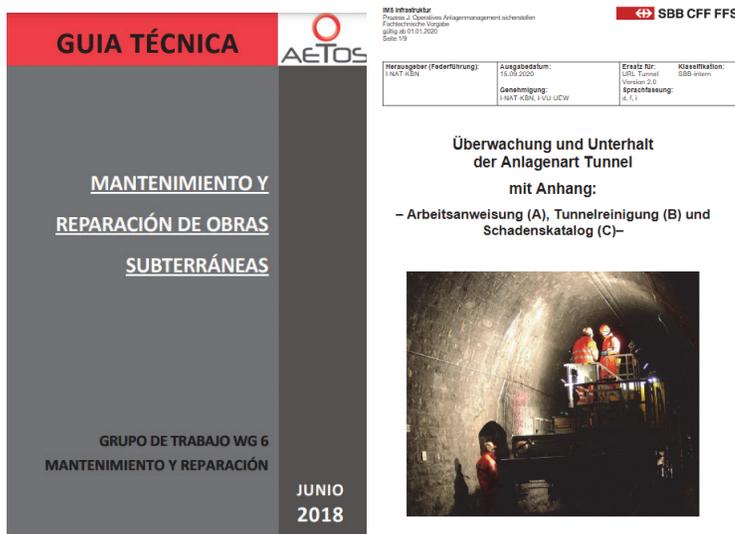


Fig. 21 – Regulations/Guidelines para inspeção estrutural de túneis em Espanha e na Suíça.

5 – BIM (BUILDING INFORMATION MODELLING) NAS OBRAS SUBTERRÂNEAS

5.1 – Alguns aspetos gerais do BIM

O BIM é um conjunto de metodologias, tecnologias e normas que permitem projetar, construir e operar um ativo de maneira colaborativa num espaço virtual.

Visa contribuir para uma transição de uma forma de trabalho tradicional, mais individual e fragmentada, a qual exige um esforço elevado para garantir a devida coordenação, para um modelo mais colaborativo, com melhor gestão da informação e da comunicação entre os diversos intervenientes.

As tecnologias envolvidas, como por exemplo o *hardware*, *software* e plataformas *cloud-based*, permitem gerar e gerir informações, mediante modelos, ao longo do ciclo de vida de um ativo, desde a conceção ao descomissionamento, enquanto as metodologias, baseadas em normas, permitem garantir que a partilha destas informações é feita de maneira estruturada.

Nesse sentido, o BIM não é apenas um conjunto de modelos tridimensionais a partir dos quais se extraem as tradicionais peças desenhadas. Existe todo um enquadramento processual e normativo e uma lógica de rentabilidade do esforço e tempo despendido, o qual, por comparação com métodos de trabalho mais tradicionais, se pretende que seja investido com maior intensidade em fases precoces de projeto, nas quais é possível impactar positivamente a solução final com um custo inferior (Figura 22).

A interoperabilidade entre diferentes ferramentas BIM é um aspeto bastante relevante tendo em vista facilitar a vertente marcadamente colaborativa da metodologia. Esta interoperabilidade é dificultada pelo facto de, em regra, os *software* disponíveis no mercado terem formatos de ficheiro proprietários. Desta tensão entre a propriedade intelectual de quem desenvolve as ferramentas BIM e a necessidade de permitir a colaboração entre intervenientes surge o conceito de *openBIM*, que têm sido muito impulsionada pela BuildingSMART, entre outras entidades, a qual criou e continua a desenvolver o formato IFC (*Industry Foundation Classes*), uma chave mestra do BIM (Figura 23)

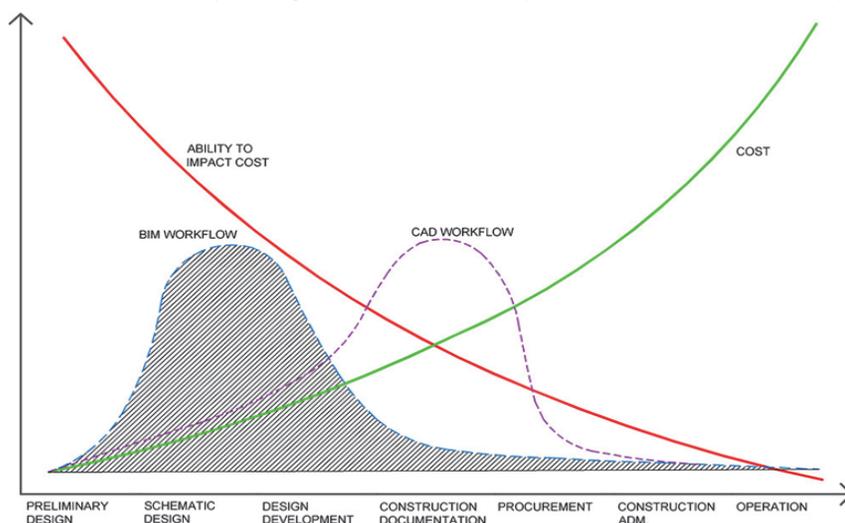


Fig. 22 – Curva de MacLeamy – taxa de esforço ao longo do ciclo de vida (CURT, 2004).



Fig. 23 – IFC e openBIM (Fonte: bimcorner.com).

5.2 – Particularidades do BIM aplicado às obras subterrâneas

Como é sabido, as obras subterrâneas têm algumas particularidades face às demais:

- Lidam com elevadas incertezas durante as fases de Projeto e Construção;
- Implicam mão-de-obra altamente especializada nas várias fases do ciclo de vida;
- Estão frequentemente associadas a investimentos iniciais avultados;
- Em regra, são desenhadas para uma vida útil de muitas décadas, dando uma importância acrescida às atividades de Operação e Manutenção.

Neste contexto, o BIM pode ser particularmente útil:

- Na gestão do elevado volume de informação a produzir e a considerar pelos vários intervenientes;
- Na integração da modelação do terreno e respetivo zonamento geotécnico com modelos de outras especialidades;
- Auxiliando a produção de modelos de cálculo geotécnicos e estruturais;
- Facilitando a boa perceção das estruturas a executar e sua relação com as estruturas existentes;
- Na implementação ágil de alterações de projeto;
- Na transição entre fases: projeto / construção / operação / descomissionamento (Figura 24).

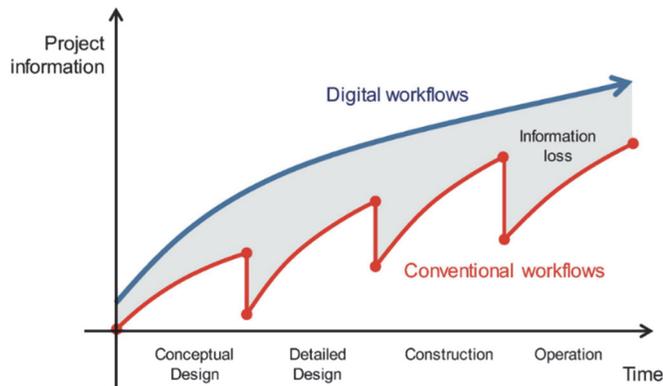


Fig. 24 – Minimização de perdas de informação na transição entre fases.

Mas o BIM nas obras subterrâneas tem também os seus desafios:

- É um mercado mais reduzido e específico, resultando numa baixa maturidade e disponibilidade de soluções geotécnicas nativas em *software* comercial corrente;
- Os *software* específicos disponíveis são relativamente dispendiosos;
- A interoperabilidade entre *software* é ainda um processo em curso.

Frequentemente é necessário, portanto, desenvolver internamente soluções viáveis, como por exemplo para modelação geométrica do terreno natural e superfícies escavadas, de elementos construtivos subterrâneos e de soluções de contenção a aplicar. Mesmo para capturar as mais valias de cada *software* disponível, por vezes é também essencial desenvolver e aplicar *workflows* específicos, não raras vezes fazendo uso de alguma criatividade (Figura 25).

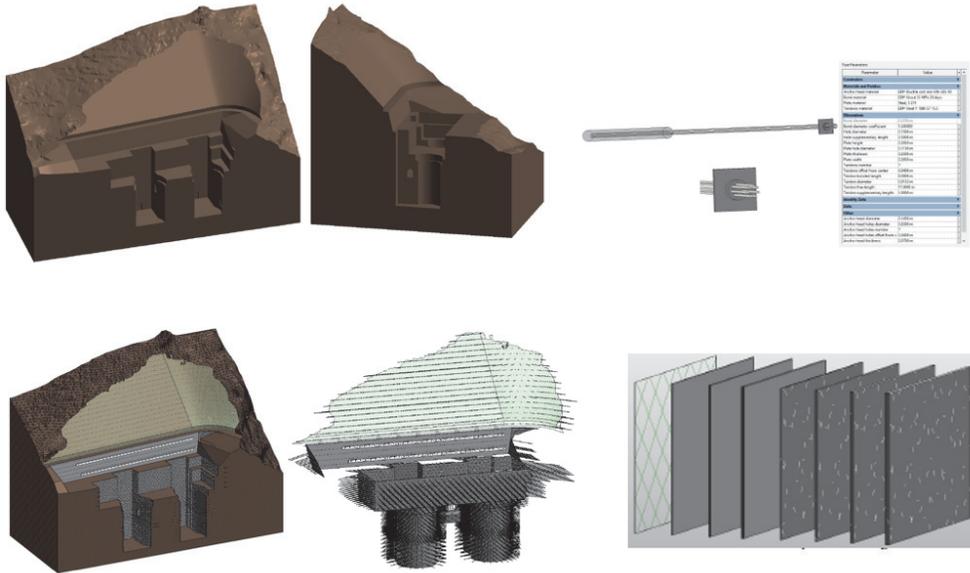


Fig. 25 – Exemplos de soluções geotécnicas tipicamente não disponíveis nativamente em software comercial corrente.

5.3 – Trabalho desenvolvido pelo Grupo de Trabalho 4 (GT4) da Comissão Portuguesa de Túneis (CPT)

O GT4 da CPT, dedicado ao “BIM e Gestão da Informação em Obras Subterrâneas”, iniciou a sua atividade em janeiro de 2021 e integra um conjunto de membros com larga abrangência da cadeia de valor da indústria da Engenharia e Construção (Figura 26).

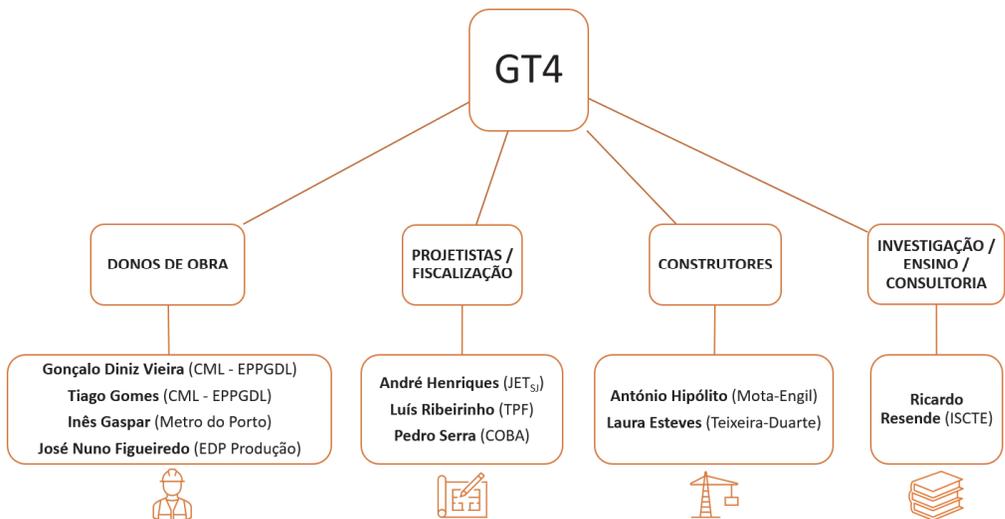


Fig. 26 – Membros do GT4 da CPT.

De entre os objetivos do GT4 destacam-se os seguintes:

- Promoção do know-how e da implementação do BIM junto da comunidade geotécnica portuguesa;
- Acompanhamento da evolução da metodologia participando em grupos BIM nacionais e internacionais;
- Troca de experiências e partilha de informação entre os membros;
- Contribuição ativa na elaboração e divulgação de normas e guias técnicos, com foco nas obras subterrâneas.

O GT4 procura ativamente articular-se com outros grupos e organizações congéneres, estando representado através de vários dos seus membros em diversos fóruns, como por exemplo na CT197-Normalização BIM, coordenada pelo BUILT CoLAB, e na *buildingSMART* Portugal, a nível nacional, ou no WG22 da *International Tunneling Association* (ITA), no *BIM Steering Committee da European Underground and Tunnel Forum* (EUTF) e na *buildingSMART International*, a nível internacional. Tem focado a sua atividade principalmente em temas como a divulgação da bibliografia BIM relevante junto da comunidade geotécnica portuguesa, a análise e divulgação das ferramentas BIM e formas de gestão da informação aplicáveis a obras subterrâneas, a elaboração de recomendações relativas à contratação BIM em obras do mesmo tipo e ainda a tradução para português de recomendações BIM internacionais.

5.4 – Alguns casos práticos de aplicação BIM às obras subterrâneas

O BIM apresenta-se com uma abordagem que favorece um modelo de trabalho mais colaborativo, o que no âmbito das obras subterrâneas pode ser particularmente útil, embora encerre também um conjunto de desafios específicos, que exigem algum esforço adicional. A indústria da construção e a comunidade geotécnica portuguesas têm abraçado estes desafios e já acumulam experiência relevante, a qual se exemplifica nas Figuras 27 a 30.

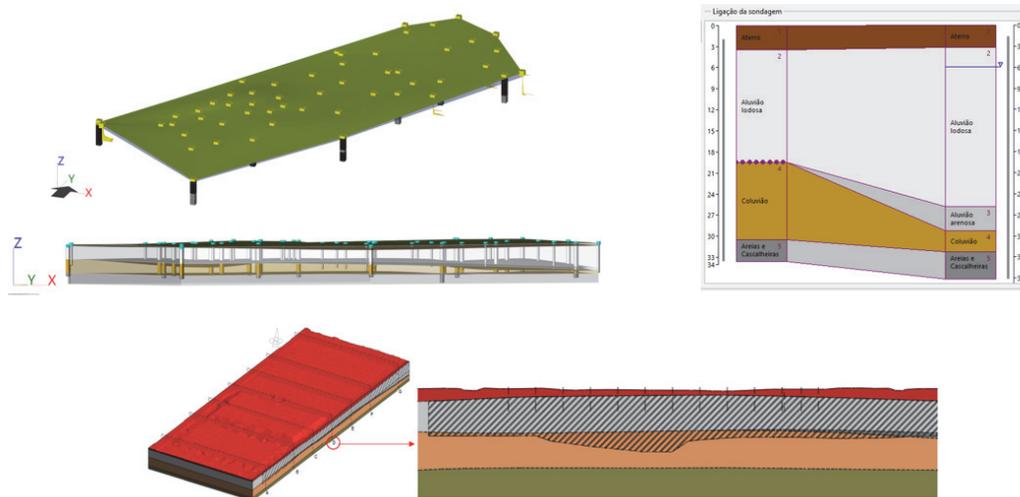


Fig. 27 – Plataforma Logística Lisboa Norte – Modelação do terreno e informação geológico-geotécnica (imagens cedidas pela TPF Consultores).

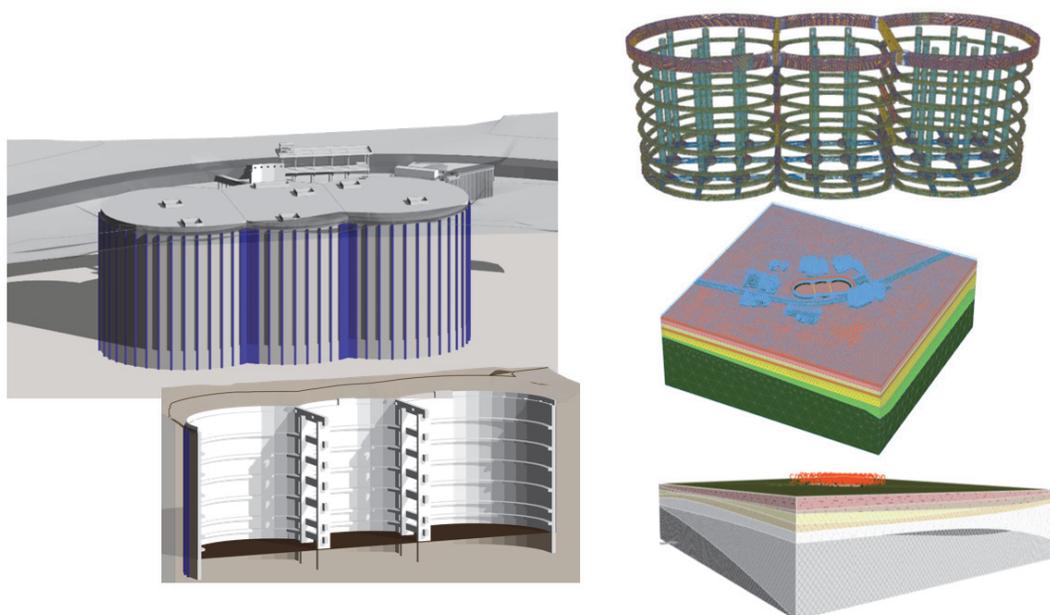


Fig. 28 – Reservatório profundo para controlo cheias (Brasil) – Modelação do terreno, estruturas e respetivas armaduras (imagens cedidas pela JetSJ).

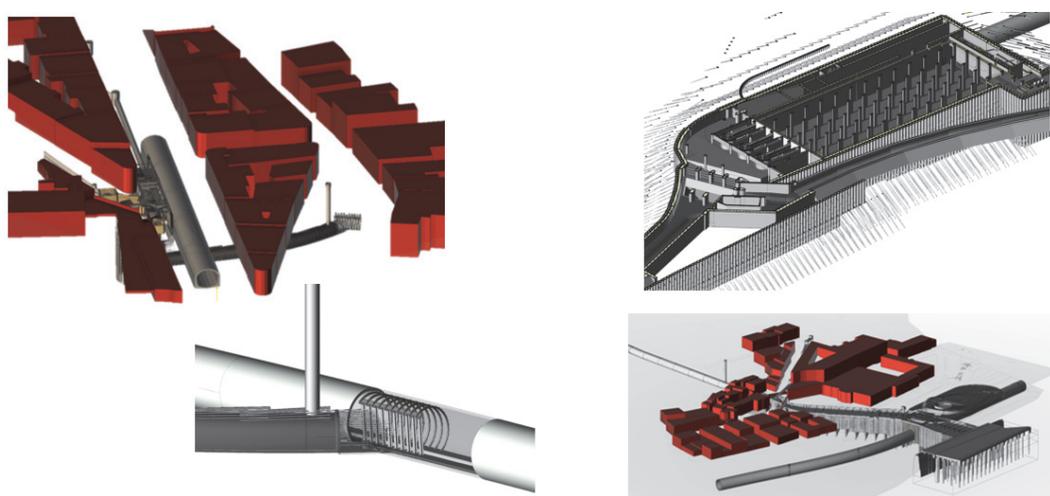


Fig. 29 – Plano Geral de Drenagem de Lisboa – Modelo BIM desenvolvido no âmbito do contrato conceção-construção dos túneis de drenagem (imagens cedidas pela CML - EPPGDL).

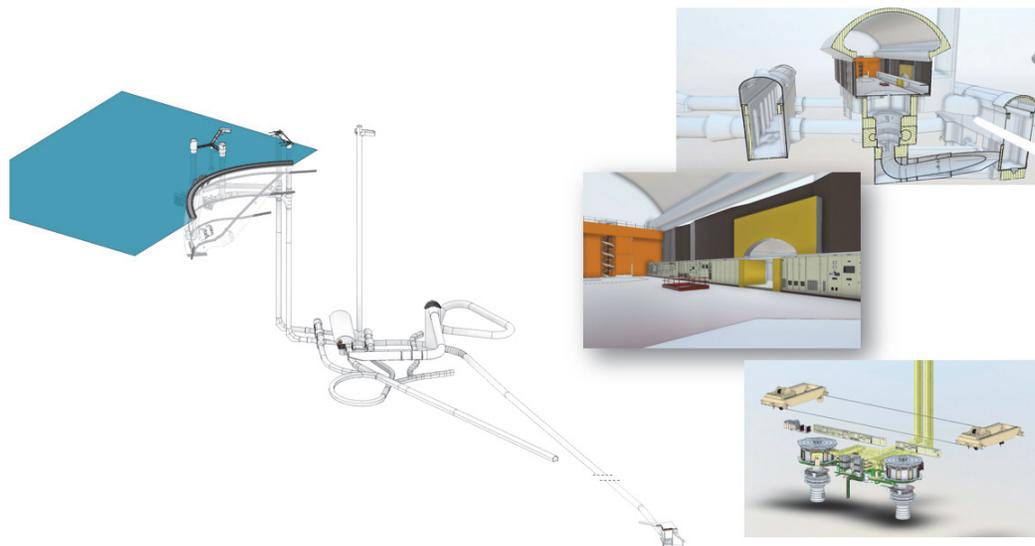


Fig. 30 – Aproveitamento hidroelétrico do Alto Lindoso – Modelo BIM para apoio a atividades de Operação & Manutenção (imagens cedidas pela EDP Produção).

6 – CONTRATAÇÃO DE OBRAS GEOTÉCNICAS COMPLEXAS

6.1 – Porque se fala em contratação (pública) numa Comissão Técnica de Túneis e Geotecnia?

As grandes obras em Portugal são, normalmente, financiadas por dinheiros públicos. Assim, a sua concretização passa, indubitavelmente, pela execução de contratos que se regem pelas regras da contratação pública, que tem vindo a ser alterada nos últimos anos. Uma das alterações mais importantes ocorreu em 2018, com a publicação do Código dos Contratos Públicos revisto em resultado da existência das diretivas comunitárias de 2014, que obrigaram à transposição para a legislação nacional de regras em matéria de contratação pública. E como para as utilizar é necessário conhecer, foi criado um grupo específico no seio da CPT que lida com “Engenharia e Legislação – melhores práticas contratuais”.

Este GT2 iniciou o seu trabalho em 2015 e tem vindo a produzir recomendações e Guias que apoiam os engenheiros e gestores na execução destas obras geotécnicas complexas, dentro da lei.

Assim surgiu o Guia de Boas Práticas para a Contratação de Obras Geotécnicas Complexas (OGC), que foi elaborado pelo GT2 da CPT em conjunto com diferentes entidades como a OE e a APPC e, recentemente, foi publicado pelo IMPIC, tendo sido inserido no leque de **Guias recomendados para aplicação prática em áreas específicas da contratação pública em Portugal**

Neste Guia OGC são apresentadas as recomendações mais relevantes, tendo em conta as melhores práticas contratuais, nacionais e internacionais, que têm em atenção a recente alteração da Legislação Portuguesa de Contratação Pública à luz das novas Diretivas Europeias

O Guia teve como objetivo inicial responder às questões (problemas) contratuais nas Obras Geotécnicas Complexas, em particular os túneis. Mas logo se percebeu que as recomendações que daí resultam podem ser estendidas, em grande medida, à contratação pública de outro tipo de obras mais abrangentes, que lidam com situações previsivelmente incertas.

No fundo, pretende-se responder à questão:

Quando é certa a incerteza, o que é certo fazer?

A pergunta surge pela dificuldade de previsão do comportamento dos terrenos e da imprevisibilidade das condições inerentes aos projetos de Obras Geotécnicas Complexas, em especial as obras subterrâneas, que conduzem a **riscos únicos em termos da construção destas obras**. Com efeito, a construção subterrânea é muito diferente de qualquer outro tipo de construção “à vista”, pois as propriedades do material de construção – as condições dos terrenos – não podem ser conhecidas com precisão a priori. As condições imprevistas, a dependência dos meios e dos métodos construtivos, o acompanhamento e análise dos resultados da monitorização e os inevitáveis riscos de construção são fatores típicos da construção subterrânea em geral, e que ganham particular relevo na construção de túneis.

Dada a incerteza inerente aos trabalhos que são condicionados pela natureza geológica e geotécnica do terreno (por ex. os trabalhos de escavação e suporte de um túnel) e a impossibilidade de utilização do regime de série de preços (conforme é recomendado pelos melhores modelos internacionais de contratação da Federação Internacional de Consultores de Engenharia - FIDIC, entre outros) ao abrigo do Código dos Contratos Públicos (CCP), os modelos contratuais usualmente utilizados de uma forma rígida sem atender às especificidades destas obras são inadequados quando aplicados aos projetos de OGC.

A elaboração do Guia justifica-se porque as formas “tradicionais” de contratação não tratam de forma adequada as particularidades das OGC. Com a metodologia nele definida aumenta-se a possibilidade de serem atingidos, com sucesso, os objetivos do empreendimento/ projeto/ construção por parte de todos os seus intervenientes.

6.2 – Definição de Obra Geotécnica Complexa

Entende-se por OGC uma obra complexa do ponto de vista geotécnico, em que o desempenho da estrutura, o seu processo construtivo, a durabilidade da obra e a estabilidade das construções e infraestruturas vizinhas podem ser significativamente prejudicados pela imprevisibilidade das condições geotécnicas do local da obra.

Como exemplos:

- i. Túneis e obras subterrâneas,
- ii. Fundações especiais profundas,
- iii. Fundações de barragens,
- iv. Fundações de obras portuárias,
- v. Obras de escavação com profundidade significativa (em geral >15m prof.)
- vi. Estabilização de taludes;
- vii. Outras obras geotécnicas com elevada incerteza associada.

6.3 – Recomendações mais relevantes

As recomendações do Guia respeitam a atual legislação de contratação pública, seguindo uma metodologia que se considera como a mais adequada para a contratação de empreitadas de obras geotécnicas complexas, como é o caso paradigmático dos túneis (mas não só). Esta metodologia conjuga o carácter particular das obras geotécnicas complexas, com as novas possibilidades contratuais criadas com a entrada em vigor da atual versão do CCP, nomeadamente no que se refere à modificação objetiva dos contratos e resolução alternativa de conflitos.

O risco numa obra deste tipo assume diversas variáveis, desde o risco geotécnico, ao arqueológico, ou mesmo o risco do desconhecimento da exata localização das interferências à superfície ou a pequena profundidade (das infraestruturas concessionadas quando a obra decorre em meio urbano), mas em qualquer situação existe um princípio que deve ser sempre cumprido: o risco deve ser partilhado e alocado à parte que melhor o gere, mas não pode, nunca, ser menosprezado ou esquecido. É, pois, de fundamental importância que no contrato estejam claramente identificadas as obrigações e responsabilidades de cada parte. É também muito importante que os mecanismos para

lidar com os desacordos e incertezas que necessariamente irão ocorrer, de tempo a tempo, entre as partes, estejam explicitamente indicados.

As recomendações do Guia são baseadas nas melhores práticas contratuais internacionais (ITA / FIDIC) que, entre outras situações, recomendam a alocação equilibrada do risco:

- O risco deve ser partilhado e assumido pela parte que melhor o gere, pelo que quando está relacionado com o terreno (variações significativas) deve ser assumido pelo Dono de Obra, mas quando está relacionado com o desempenho, então deve ser assumido pelo Empreiteiro (Figura 31).

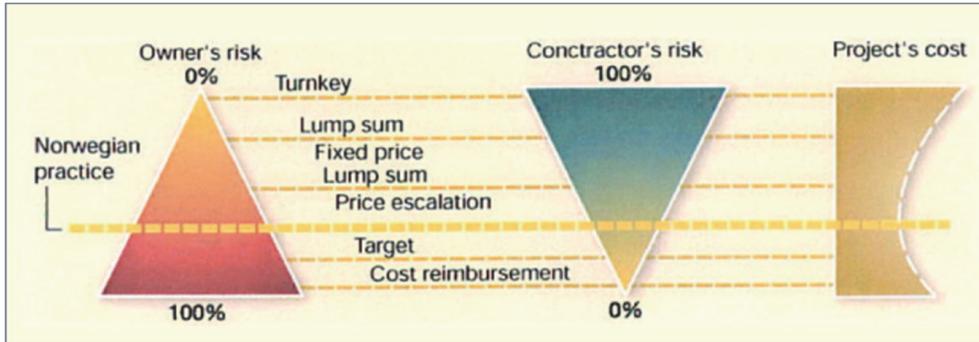


Fig. 31 – Partilha contratual equilibrada do risco.

Uma outra recomendação muito relevante prende-se com a **disponibilização de toda a informação geológica e geotécnica** possível, através dos **Relatórios Geotécnicos de Referência (GBRs)**, que deve ser incentivada para promover a transparência e repartição equitativa dos riscos e facilitar a resolução de conflitos.

Existem diversas outras recomendações no Guia, que se resumem e nomeiam no esquema da Figura 32, e podem ser detalhadamente descritas com uma leitura do Guia que está disponível de forma gratuita:

✓ **Projeto por cenários OGC + MOC**

Duplo envelope

✓ **CLPQ** para serviços de engenharia (projeto e fiscalização)

✓ Proposta economicamente + vantajosa (nunca “preço + baixo”!)

✓ **Revisão de Projeto** e Assistência Técnica Especial do projetista em todas as OGC

✓ Quando se tratar de Concursos Concessão-Construção (art.43º, n.º3 CCP):

- Preparar bem o concurso, com GBR e Programa Preliminar Robusto (idealmente **Estudo Prévio**, ainda que a lei indique a designação de **prog. preliminar**.)

Remuneração das melhores propostas técnicas, 1%PB para os 2º, 3º e 4º classificados com boa nota técnica

✓ Correta definição do Preço Base

✓ **CREC** para resolução expedita de conflitos

Maior flexibilidade contratual exige um maior rigor na preparação!

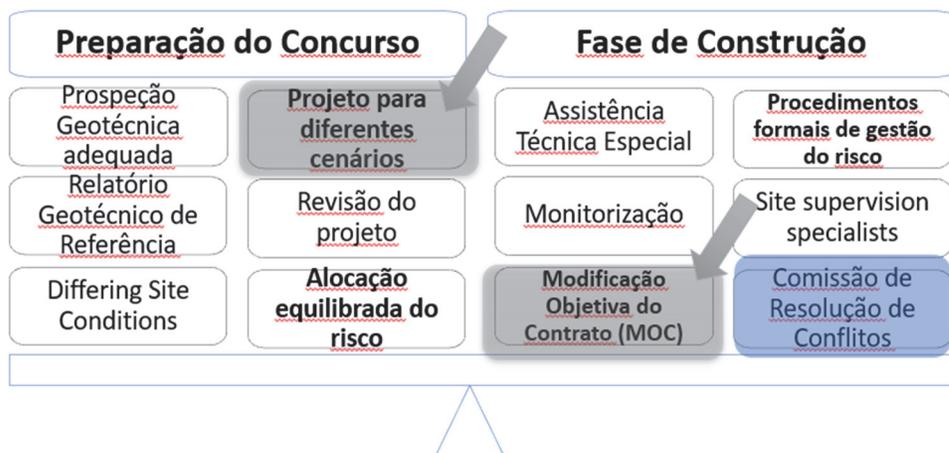


Fig. 32 – Resumo das recomendações do Guia.

As melhores práticas contratuais em países com grande tradição neste tipo de obras geotécnicas complexas promovem a **adequação dos métodos construtivos inicialmente previstos às condições reais encontradas em obra** (através da utilização do método observacional, conforme estabelecido no capítulo 2.7 da Norma Europeia de Projeto Geotécnico – EC7: Parte 1 Regras Gerais).

O documento dirige-se não só às entidades adjudicantes que já decidiram avançar com a opção de construção de uma Obra Geotécnica Complexa mas também a todos os intervenientes no processo de elaboração do projeto, de preparação do procedimento concursal e das peças procedimentais e que depois vão também acompanhar a obra durante a sua construção. No fundo, todos os *stakeholders* envolvidos no processo de preparação, financiamento, construção, fiscalização e manutenção ao longo do seu ciclo de vida.

As aplicações das recomendações do Guia apontam para a utilização de soluções legislativas adaptadas a esta realidade, que acompanhem as melhores práticas construtivas, permitam uma **melhor gestão do risco geotécnico e conduzam a uma maior economia e segurança** na globalidade destas obras.

As recomendações inscritas do Guia podem ser estendidas, na sua maioria, à contratação pública de outro tipo de **obras que também lidam com situações previsivelmente incertas** (obras com forte componente arqueológica, de restauro ou recuperação de estruturas existentes, etc.). Agora que as recomendações estão consolidadas (revistas pelo IMPIC) é altura de passar à fase seguinte: implementação. Nessa aplicação todos somos importantes, para tentar trazer as melhores práticas contratuais para Portugal.

7 – AGRADECIMENTOS

A CPT agradece à SPG pelo convite formulado para realizar esta apresentação, aos colegas que colaboram empenhadamente nos grupos de trabalho para produzir material atualizado, aos donos de ativos, promotores, construtores, projetistas e fornecedores de equipamentos pela disponibilização da informação aqui partilhada.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CURT (2004). *Collaboration, Integrated Information, and the Project Lifecycle in Building Design, Construction and Operation*. Architectural/Engineering Productivity Committee of The Construction Users Roundtable (CURT), p 4.
<https://kcuc.org/wp-content/uploads/2013/11/Collaboration-Integrated-Information-and-the-Project-Lifecycle.pdf>
- CPT (2022). *Guia de boas práticas de segurança e saúde para a fase de construção de obras subterrâneas*. Comissão Portuguesa de Túneis e do Espaço Subterrâneo, Sociedade Portuguesa de Geotecnia. ISBN 978-989-33-2368-7
<https://spgeotecnia.pt/wp-content/uploads/2024/02/cpt-guia-de-sh-nas-obras-subterraneas-v-final.pdf>
- OE-CPT-APPC (2020). *Guia de boas práticas para a contratação de obras geotécnicas complexas*. Ordem dos Engenheiros, Comissão Portuguesa de Túneis da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Associação Portuguesa de Projectistas e Consultores.
<https://spgeotecnia.pt/wp-content/uploads/2022/10/guia-contratacao-ogc-2020.pdf>
- Pistone, R. S. e Pinto da Cunha, eds. (2014). *Túneis em Portugal / Tunnels in Portugal*. Comissão Portuguesa de Túneis, Sociedade Portuguesa de Geotecnia e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, ISBN 978-972-98781-9-0
<https://spgeotecnia.pt/wp-content/uploads/2022/10/livro-de-tuneis-em-portugal-completo-compactado-compressed.pdf>

ENSINO E INVESTIGAÇÃO DA GEOTECNIA NAS UNIVERSIDADES EM PORTUGAL. UMA PERSPETIVA SOBRE AS ÚLTIMAS OITO DÉCADAS

Education and research in Geotechnics in Portuguese universities. A perspective over the last eight decades

Manuel de Matos Fernandes^a

^a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

RESUMO – O trabalho passa em revista, de forma resumida, o ensino e a investigação em Geotecnia nas universidades portuguesas ao longo das últimas 8 décadas. Essa retrospectiva começa na década de 1940, na qual foram identificadas as primeiras ações significativas. Para o período após 2010, no essencial a última década, apresenta-se uma análise mais desenvolvida, que identifica graves dificuldades que afetam atualmente a qualidade da formação geotécnica e o número de engenheiros civis saídos da Universidade com essa formação, bem como a renovação do corpo docente necessário para a ministrar. O trabalho termina com duas propostas. A primeira diz respeito a um novo curso de especialização-mestrado, com o objetivo de ultrapassar as carências de formação e o número de profissionais habilitados. A segunda apresenta uma metodologia para discutir e fixar, com consenso alargado e informado, a data de fundação da Sociedade Portuguesa de Geotecnia.

ABSTRACT – The work provides a summary review of education and research in Geotechnics in Portuguese universities over the past 8 decades. This retrospective begins in the 1940s, during which the first significant actions were identified. For the period after 2010, essentially the last decade, a more developed analysis is presented, which identifies serious difficulties that currently affect the quality of geotechnical education, the number of civil engineers graduating from university with this skill, as well as the renewal of the teaching staff. The work concludes with two proposals. The first concerns a new specialization-master's course aimed at overcoming the deficiencies in training and the number of qualified professionals. The second presents a methodology for discussing and setting, with broad and informed consensus, the founding date of the Portuguese Society for Geotechnics.

Palavras Chave – ensino, investigação, universidade, história, Sociedade Portuguesa de Geotecnia.

Keywords – education, research, university, history, Portuguese Society for Geotechnics.

1 – INTRODUÇÃO

O presente trabalho resultou de uma apresentação do autor no Seminário intitulado “A Geotecnia como Referência da Engenharia Portuguesa”, por ocasião da comemoração dos 50 anos da Sociedade Portuguesa de Geotecnia e dos 75 anos do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, na sequência de convite das presidências das duas instituições.

E-mail: matos.fernandes@fe.up.pt

ORCID: orcid.org/0000-0003-2661-9357

O tema da apresentação foi definido no contexto do convite, endereçado na mesma ocasião a Ricardo Oliveira, facto que reforçou o carácter especialmente honroso com que o convite foi considerado (e aceite) pelo autor deste trabalho.

Nesta Introdução é importante clarificar o enquadramento e os limites da apresentação efetuada no evento referido e do presente trabalho:

1. a abordagem foi limitada às Universidades, dado que o LNEC foi objeto de intervenção especialmente dedicada;
2. por outro lado, os Institutos Politécnicos não foram abordados, por manifesta falta de tempo, quer na recolha de dados, quer na própria apresentação;
3. a abordagem foi focada nos Cursos de Engenharia Civil, isto é, nas Licenciaturas (pré-Bolonha, antes de 2006/07), nos Mestrados Integrados (pós-Bolonha) e nos atuais cursos formalmente independentes de Licenciatura e Mestrado (desde 2021/22);
4. as referências aos cursos de mestrado clássicos, bem como aos cursos de Engenharia Geológica, ficaram, por comum acordo, da responsabilidade de Ricardo Oliveira, embora alguns dados parcelares dos mesmos sejam incluídos no presente trabalho.

Porquê oito décadas?

Porque a investigação realizada para a preparação do trabalho – a qual, importa reconhecer, foi particularmente gratificante – permitiu desde cedo concluir que seria obrigatório incluir a década de 1940 (aliás muito fértil, como se verá). Isto, sem embargo de o autor não ter dúvidas em situar, simbolicamente, o nascimento da nossa associação na década seguinte, a década de 1950, assunto que será desenvolvido na parte final do trabalho.

Tirando partido da sua elevada faixa etária, o autor adotou uma postura do tipo “impressionista”: refletindo nos dados recolhidos e na sua vivência nas décadas menos remotas, procurou identificar os factos e as tendências mais relevantes, que permitissem caracterizar cada uma das décadas de per si e traçar uma imagem coerente e dinâmica do seu conjunto.

Foi este, no essencial, o exercício que o autor ousou realizar e que é apresentado em seguida. Para as décadas mais recuadas, aproveitava-se para apresentar alguns pormenores e documentos menos conhecidos, resultantes da pesquisa nos arquivos consultados.

2 – UMA PERSPETIVA SOBRE AS ÚLTIMAS 8 DÉCADAS

2.1 – Década de 1940. Os primórdios

A década de 1940, apesar da Guerra (ou, porventura, em consequência da mesma), é fértil em acontecimentos que revelam o interesse crescente pela “nova ciência” dos solos, que emergira timidamente nas duas décadas anteriores. Refira-se, a propósito, que o I Congresso da International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE) se tinha realizado em 1936 na Universidade de Harvard, Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos da América.

No nosso País, é fundado em 1942 no Instituto Superior Técnico (IST), sob a liderança de Manuel Rocha, o Centro de Estudos de Engenharia Civil. Este centro daria origem em 1946 ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), cujo primeiro Presidente seria o Engenheiro Eduardo Arantes e Oliveira.

O fulgurante sucesso que constituiu o LNEC nas décadas seguintes é bem conhecido. Esse sucesso, como se verá, estendeu-se de modo muito vigoroso à Geotecnia. Daí que, num trabalho com o cariz do presente, a referência à fundação do Centro de Engenharia Civil/Laboratório Nacional de Engenharia Civil ser incontornável. Até porque o LNEC, ao ter como origem o IST, nasceu, de facto, na Universidade.

Em 1948, já com a Europa em reconstrução após o fim da Guerra, o II Congresso da ISSMFE realiza-se em Roterdão, uma das cidades europeias que conheceu maior grau de destruição com o conflito. A consulta dos 7 volumes das atas deste congresso revela um extraordinário progresso desde 1936. Participam muitos dos que hoje são considerados pais-fundadores da Mecânica dos

Solos: Terzaghi, Casagrande, Caquot, Peck, Meyerhoff, Bishop, Bjerrum, Skempton, Proctor, Taylor, Brinch Hansen, Hvorslev.

A participação portuguesa (a primeira em congressos da ISSMFE) resumiu-se a Manuel Rocha (é o que se pode deduzir de uma análise cuidada da lista de participantes), que não apresentou trabalho técnico. É legítimo imaginar que este congresso, e o contacto com os pais-fundadores da Mecânica dos Solos, terá sido muito marcante para o então jovem (35 anos) Manuel Rocha, que logo naqueles anos após a fundação do LNEC iria atribuir particular relevância aos temas da Geotecnia (Maranha das Neves, 2018).

Permita-se um parêntesis para mencionar que a delegação brasileira ao Congresso de Roterdão foi bastante numerosa, contando-se entre os participantes Milton Vargas, Antonio José da Costa Nunes e Fernando Pacheco Silva. É provável que tenha sido nessa ocasião que Manuel Rocha conheceu aqueles ilustres geotécnicos brasileiros, e que aí se tenha começado a forjar a forte afetividade e colaboração das comunidades geotécnicas brasileira e portuguesa.

O ano de 1948 seria também o ano de fundação da revista *Géotechnique*, pelo Institution of Civil Engineers do Reino Unido.

No nosso país dá-se a publicação em 1942 do primeiro livro relacionado com a Mecânica dos Solos em língua portuguesa. Da autoria de Francisco Correia de Araújo, docente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), intitula-se “Estudo dos Maciços Terrosos e dos seus Suportes” (Correia de Araújo, 1942).

É um livro focado, como o próprio nome indica, nas teorias clássicas de pressões de terras e no dimensionamento de muros de suporte gravidade, contendo ainda na parte final um capítulo sobre capacidade de carga de fundações. O livro está cuidadosamente ilustrado e contém, para o cálculo dos impulsos de terras, grande número de figuras (algumas em página desdobrável) com construções gráficas, então ainda muito usadas na Engenharia, face à limitação dos meios de cálculo numérico.

A Figura 1 é um exemplo, e também uma homenagem ao Autor, mostrando a construção de Poncelet para cálculo do impulso ativo num muro gravidade com tardoz quebrado.

Antes da década terminar, é de registar a publicação de novo livro, “A Mecânica do Solo e as suas Aplicações”, pelo Engenheiro Manuel Pimentel dos Santos, então Diretor do Laboratório de Ensaio de Materiais e de Mecânica do Solo de Moçambique (Pimentel dos Santos, 1949). É um livro de espectro largo, que incorpora muitos dos desenvolvimentos contemporâneos, apresentando a formulação em tensões efetivas (o que não é claro no livro anteriormente referido).

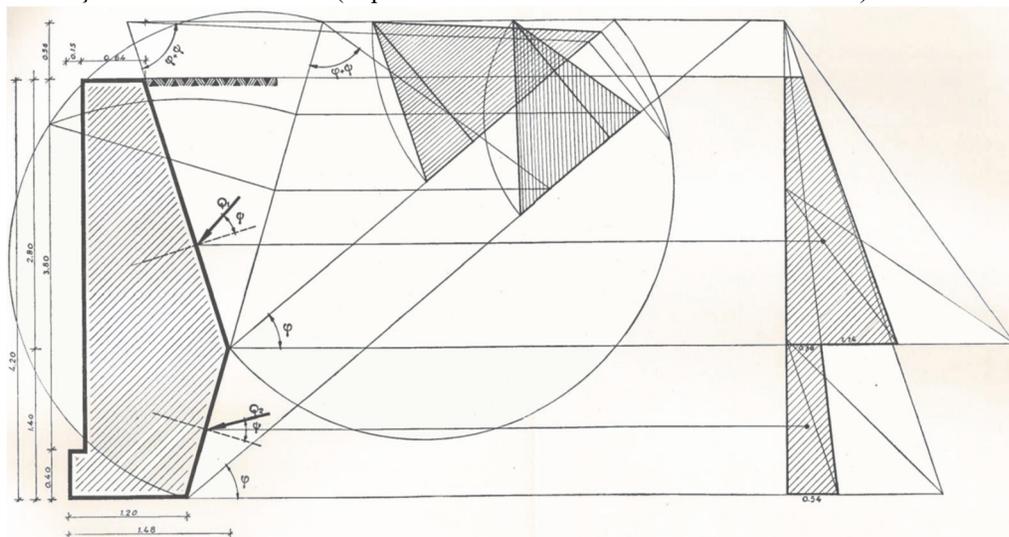


Fig. 1 – Cálculo do impulso ativo num muro gravidade com tardoz quebrado pela construção de Poncelet (Correia de Araújo, 1942).

A publicação deste livro em Moçambique simboliza a excelência do trabalho realizado, não só naquele território, mas também em Angola, pelos Laboratórios de Engenharia Civil, que se manteve até à descolonização. No campo da Geotecnia merecem especial menção, além de Manuel Pimentel dos Santos, autor do livro em causa, Júlio Barreiros Martins, Henrique Novais Ferreira e Rui Furtado.

Antes de terminar esta secção, merece ainda ser referida uma curiosa publicação em francês, datada de 1943, ocupando integralmente um número da Revista da Faculdade de Engenharia, reunindo o conteúdo de uma série de palestras proferidas na FEUP pelo Professor Edgar Schultz, da Universidade de Berlim (possivelmente exilado do seu país, tendo em conta a data), sobre “Application de la Mécanique du Sol” (Schultz, 1943).

Trata-se igualmente de um texto com muita qualidade, abordando não apenas os aspetos teóricos, com manifesta atualização de conhecimentos, mas também o dimensionamento de diversas obras geotécnicas. No prefácio o autor escreve: “*le grande tâche de l’avenir consiste à transformer en une monnaie courante utilisable par chaque ingénieur, le filon d’or des connaissances que la mécanique du sol nous permet d’acquérir*”.

Não deixa de ser digna de registo esta atividade editorial, com obras abrangentes, o que sem dúvida atesta que na engenharia portuguesa havia personalidades muito sensibilizadas para a importância da nova ciência dos solos e para a urgência da sua divulgação na Profissão, como aliás se verá logo no início da década seguinte.

2.2 – Década de 1950. A fundação

O título (A fundação) atribuído à década de 1950 é justificado pelo facto de ter sido nesta década que o ensino da Mecânica dos Solos foi verdadeiramente autonomizado e institucionalizado no nosso País.

Na Universidade, é justo destacar o papel pioneiro da FEUP. Em 1951 é fundado nesta escola, sob liderança de Francisco Correia de Araújo, o chamado Seminário de Estudos de Estabilidade. Na prática, constituía um centro de investigação centrado na Engenharia de Estruturas, mas com abrangência programática e científica lata, que viria a envolver não só os materiais estruturais, mas também a Mecânica dos Solos. Esse Seminário reunia uma equipa de distintos académicos que assegurariam grande prestígio à faculdade nos anos seguintes.

No extenso documento fundador programático do Seminário, pode ler-se a certo passo (sic): “*Supõem os signatários indiscutível a necessidade (...) de serem creadas duas cadeiras novas anuais: uma em que se tratem os problemas levantados pelas técnicas mais avançadas, mas já correntes, da construção actual, especialmente de betão armado (...); outra onde se faça o ensino dos princípios gerais da Mecânica do Solo, ciência nova cujas importantes aplicações em todos os ramos da engenharia moderna até justificariam a institucionalização de curso especializado de mais um ano*”.

Num curioso ofício datado de 23 de março de 1952, dirigido seu “Colega e Amigo” Arantes e Oliveira, Diretor do LNEC, Correia de Araújo anuncia-lhe a fundação do Seminário:

“*É jubilosamente que venho hoje participar-lhe que existe, de facto, na Faculdade de Engenharia, o Seminário de Estudos de Estabilidade, cuja actividade se tem mantido, com toda a regularidade, desde o começo do ano lectivo e que, sem demasiado optimismo, se pode esperar continue no futuro. (...)*”.

Após uma detalhada descrição da atividade desenvolvida e dos planos futuros, Correia de Araújo remata:

“*Como verifica, e não obstante serem evidentemente comuns os nossos objectivos, seguimos caminho diferente do Laboratório pois julgamos que as actuações do Laboratório e do Seminário devem ser complementares e convergentes e não vemos vantagem em que sejam concorrentes (desculpe se esta geometria não é perfeitamente ortodoxa: a intenção é-o)*”.

Uma das primeiras iniciativas do Seminário foi a organização de cursos livres sobre **Mecânica do Solo**, em horário pós-laboral, destinados a “estudantes do 2º ano” (note-se que nessa altura, após 3 anos de disciplinas preparatórias na Faculdade de Ciências, os estudantes transitavam para a Faculdade de Engenharia para cursarem mais 3 anos de disciplinas de Engenharia), a outros estudantes e a engenheiros diplomados.

O primeiro curso iniciou-se em abril de 1952, mostrando a Figura 2 o anúncio publicado no jornal O Comércio do Porto. O curso, estruturado em 24 sessões, teve como docentes principais Francisco Correia de Araújo e Armando Campos e Matos, tendo também participado na docência António de Sousa Taveira e Manuel Moreira do Amaral. Foi frequentado por 52 estudantes do 2º ano e por 18 estudantes de outros anos e(ou) engenheiros diplomados. Este curso teve edições anuais até 1955.

A Figura 3 mostra uma fotografia de Francisco Correia de Araújo e Armando Campos e Matos numa visita à obra da Ponte de Abreiro sobre o rio Tua em meados da década.

No mesmo ano de 1952 teve lugar em Lisboa, com organização da Ordem dos Engenheiros, o primeiro **Curso de Mecânica dos Solos**, de cariz nacional. As aulas decorreram nas instalações do Instituto Superior Técnico.

Faça-se um parêntesis para notar a distinção das designações dos dois cursos (o da FEUP e o da OE), com o uso do singular (Mecânica do Solo) e do plural (Mecânica dos Solos). A primeira designação foi provavelmente influenciada pelo Francês (*Mécanique du Sol*), então ainda dominante na Academia, e, possivelmente, pelo Espanhol (*Mecánica del Suelo*). O plural vingou, como é sabido. A explicação para o facto poderá ser provavelmente encontrada no Português do Brasil: em 1950 tinha sido fundada, aliás com a presença de Manuel Rocha, a Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, presidida por Milton Vargas.

O curso de 1952 da OE foi organizado pela **Comissão de Mecânica dos Solos**, ativa pelo menos desde o ano anterior, com a constituição descrita no Quadro 1.

Desconhece-se o número de participantes no curso, mas o impacto foi seguramente considerável. O volume correspondente às lições foi publicado pela OE em 1955 (OE, 1955). Uma consulta detalhada do mesmo atesta o elevado nível atingido. O Quadro II inclui lista dos capítulos e dos respetivos autores, muito provavelmente docentes da respetiva matéria. É de referir que dois dos autores não integravam a Comissão de Mecânica dos Solos: Armando da Palma Carlos e Fernando Branco.

O capítulo introdutório de Manuel Rocha (o mais extenso) é, ainda hoje, um texto notável. Dá uma perspetiva muito abrangente e rigorosa da nova disciplina, desde as características físicas e químicas dos meios particulados, ao papel da água nos poros, à resistência ao corte (em condições drenadas e não drenadas), às relações entre as tensões e as deformações, e aos ensaios para a sua



Fig. 2 – Anúncio publicado no jornal O Comércio do Porto em 23/04/1952 sobre o 1º curso livre de Mecânica do Solo organizado na FEUP.



Fig. 3 – Francisco Correia de Araújo (à direita) e Armando Campos e Matos (à esquerda) em visita à obra da Ponte de Abreiro sobre o rio Tua, de que foram projetistas, provavelmente em 1955 (foto de João Calheiros Cruz).

caracterização. Sublinha que a nova designação atribuída por Terzaghi em 1925 para a disciplina que na Engenharia Civil trata dos problemas dos maciços terrosos, a *Mecânica dos Solos*, “marca uma nova atitude na maneira de encarar os problemas dos maciços cujo traço característico é a preocupação de ter em conta a complexidade, que todos os dias constatamos, do comportamento dos solos”. E remata afirmando que “a Mecânica dos Solos trilha um caminho análogo à Resistência de Materiais, isto é, procura prever o comportamento dos maciços a partir de teorias que se apoiam no conhecimento das propriedades mecânicas dos solos e das solicitações actuates”.

No ano letivo de 1955/56 o plano de estudos dos cursos de Engenharia Civil das duas escolas de Engenharia em Portugal passa a incluir uma disciplina semestral de Mecânica dos Solos. De acordo com relatório do Seminário de Estudos de Estabilidade do ano de 1955: “o plano de estudos das duas escolas de Engenharia portuguesas, recentemente posto em vigor, inclui, nos cursos de Engenharia Civil, um curso semestral de Mecânica dos Solos e um curso anual de Betão Armado e Pré-esforçado, em vez do antigo curso de Cimento Armado. Deixam, assim, de ter razão de ser os cursos livres instituídos pelo Seminário, que já no ano lectivo corrente se não darão. Parece legítimo deixar aqui consignado que a providência oficial agora tomada consagra esta iniciativa, com que se deu começo ao ensino organizado, em Portugal, de matérias hoje essenciais à técnica da construção”.

Quadro 1 – Comissão de Mecânica dos Solos da OE (incluída no volume referente ao Curso de Mecânica dos Solos de 1952, publicado em 1955).

PRESIDENTE
Eduardo Arantes e Oliveira (1)
VICE-PRESIDENTE
Manuel Coelho Mendes da Rocha (2)
SECRETÁRIOS
José Maria Seguro (3)
Abel Simões (4)
VOGAIS
António de Avelar Marinho Falcão (5)
Armando de Campos e Matos (6)
Fernando Vasco Costa (7)
Francisco Jacinto Sarmento Correia de Araújo (8)
Henrique Burnay Morales de los Rios da Silva Leitão (9)
Jaime Rebelo Pinto (10)
João Carlos Câncio da Silva Escudeiro (11)
João de Matos da Silva (12)
Jorge Maria Tavares Alves Martins (13)
José de Brito Folque (14)
José Estevão Abranches Couceiro do Canto Moniz (15)
José Manuel Gonçalves Figueira (16)
Luís de Castro e Sola (17)
Manuel Pimentel Pereira dos Santos (18)
Manuel de Sousa Rodrigues (19)
Paulo de Paiva Ricou (20)
Pedro Moura Brás Arsénio Nunes (21)
Úlpio da Fonseca Nascimento (22)

Quadro 2 – Capítulos e autores do Curso de Mecânica dos Solos da Ordem dos Engenheiros realizado em 1952 (OE, 1955).

Capítulo	Autor
A Mecânica dos Solos: seu papel na Engenharia Civil (64 p.)	Manuel Rocha
Composição dos Solos (36 p.)	José Maria Seguro
O Comportamento da água nos solos (42 p.)	Úlpio Nascimento
Compressibilidade e consolidação dos solos (33 p.)	Armando Campos e Matos
Resistência dos solos (43 p.)	Francisco Correia de Araújo
Prospecção e amostragem (38 p.)	Henrique Leitão
Classificação dos solos (29 p.)	Abel Simões
Teoria da compactação (18 p.)	Pedro Arsénio Nunes
Técnicas de compactação (33 p.)	Armando da Palma Carlos
Estabilização de solos (34 p.)	Manuel Pimentel dos Santos
Maçios terrosos e sua estabilidade (35 p.)	José Folque
A acção do tempo e das intempéries nos solos (30 p.)	Úlpio Nascimento
Capacidade de carga dos solos (21 p.)	José Folque
Drenagem e defesa contra as águas subterrâneas (40 p.)	José Gonçalves Figueira
Simbologia de Mecânica dos Solos (8 p.)	Fernando Branco

A docência do curso de Mecânica dos Solos é entregue na FEUP a Armando Campos e Matos e no IST a Jaime Rebelo Pinto, ambos membros da Comissão de Mecânica dos Solos da OE. No Quadro 3 inclui-se um projeto de programa da disciplina retirado de um manuscrito de Armando Campos e Matos, do ano de 1952.

Quadro 3 – “Programa resumido da cadeira de Mecânica do Solo”, manuscrito de Armando Campos e Matos, 1952.

- 1 – Os solos e as suas propriedades físicas e mecânicas.
 - 1.1 – Generalidades.
 - 1.2 – Elementos geológicos e mineralógicos. Prospecção. Amostras: colheita e conservação.
 - 1.3 – Ensaios dos solos.
 - 1.3.1 – Ensaios de laboratório: teoria e técnica.
 - 1.3.2 – Ensaios de campo. Ensaios directos de carga: caso das fundações e das estradas e aeródromos. Ensaios de penetração em profundidade.
 - 1.4 – Classificação dos solos.
- 2 – Teorias de equilíbrio de maciços terrosos.
- 3 – Estabilidade das obras.
- 4 – Teoria da filtração e da consolidação. Aplicações.
 - 4.1 – O movimento da água nos solos. Generalidades.
 - 4.2 – Drenagem.
 - 4.2.1 – Drenagem superficial e drenagem profunda. Teoria e técnicas.
 - 4.2.2 – Rebaixamento do nível freático.
 - 4.2.3 – Efeitos da filtração sobre as condições de equilíbrio dos maciços terrosos.
 - 4.3 – Consolidação.
 - 4.3.1 – Teoria de Terzaghi-Frölich ou da analogia termodinâmica
 - 4.3.2 – Cálculo de assentamentos. Caso das fundações directas e por estacaria.
 - 4.3.3 – Cálculo dos assentamentos produzidos pelo rebaixamento do nível freático.
5. – Os solos como material de construção.
 - 5.1 – Generalidades.
 - 5.2 – A compactação dos solos. Técnicas de compactação e ensaios de controle.
 - 5.3 – A estabilização dos solos. Estabilização por mistura com aglomerantes e com cimento.
 - 5.4 – Aplicações à execução dos aterros e dos pavimentos de estradas e aeródromos e das barragens de terra.
 - 5.5 – Equipamentos para compactação e estabilização.

2.3 – Década de 1960. A “idade do gelo” universitária

Depois de uma década muito fértil, a década de 1960 nas Universidades, pelas fontes documentais e memórias vivas hoje disponíveis, parece estranhamente pobre no que respeita a iniciativas e resultados.

Facto notável ocorre em 1965: o primeiro doutoramento em Engenharia Civil em tema geotécnico. Júlio Barreiros Martins defende na FEUP com sucesso a tese “Capacidade de Carga de

Fundações” (Barreiros Martins, 1965). O autor da tese era então membro já destacado do Laboratório de Engenharia de Moçambique.

Embora a atividade do LNEC esteja no essencial fora do âmbito do presente trabalho, pretende o autor assinalar que, em contraste com o meio universitário, esta é uma década brilhante para a Geotecnia naquele laboratório. Com efeito, verifica-se a apresentação e aprovação de 12 teses para especialista em temas geotécnicos, por investigadores que formariam uma autêntica “geração de ouro” da Geotecnia portuguesa.

Facto notável desta década foi ainda a organização no LNEC, em 1966, com enorme sucesso, do I Congresso da International Society for Rock Mechanics (ISRM). Neste congresso Manuel Rocha é eleito presidente da ISRM e o secretariado desta sociedade passa a estar sedado no LNEC (o que se verifica ainda hoje).

2.4 – Década de 1970. Os gloriosos anos 70

O título escolhido para a década de 1970 justifica-se porque no meio universitário vão ocorrer mudanças importantes, com forte impacto no futuro.

Logo na transição da década de 60 para a de 70, no ano letivo de 1969/70, António Correia Mineiro assume a regência de Mecânica dos Solos e Fundações 1 e 2 no IST. O programa das duas disciplinas torna-se muito atual e exigente, suportado por uma “sebenta” que ficaria famosa para várias gerações de engenheiros civis pela sua qualidade, profundidade e pelas centenas de figuras desenhadas “à mão levantada”, como aquela que, a título de exemplo e de homenagem, se inclui na Figura 4. Esta publicação foi primeiro editada pela Associação de Estudantes do IST e mais tarde pela FCT da UNL, após a passagem do seu Autor para a Universidade Nova de Lisboa (Mineiro, 1978).

O ensino da Geotecnia no IST é pouco depois reforçado por meio da criação da disciplina de opção de Mecânica das Rochas, lecionada por Manuel Rocha (início da década de 1970). O prestígio do docente e a novidade do tema encorajaram um elevado número de estudantes de Engenharia Civil a frequentarem a disciplina. O ensino estava apoiado num livro com o mesmo título da disciplina, da autoria de Manuel Rocha, com rigor, redação e apresentação gráfica irrepreensíveis (Rocha, 1971).

No seguimento da fundação da Universidade Nova de Lisboa (1973) são criados nesta instituição, por iniciativa de Ricardo Oliveira, Investigador do LNEC, a partir de 1975/76, dois Cursos de Pós-Graduação na Área da Geotecnia: o curso de Mecânica dos Solos, dirigido para licenciados em Engenharia Civil, e o curso de Geologia de Engenharia, dirigido para licenciados em Geologia e em Engenharia de Minas. Parte do plano de estudos dos dois cursos era comum. Estes cursos foram equiparados a Cursos de Mestrado a partir de 1980.

Nas suas primeiras edições o Campus da Caparica da UNL não existia, pelo que os cursos eram lecionados nas instalações do LNEC, sendo a maioria dos seus docentes investigadores deste Laboratório.

O corpo docente era do mais alto nível. O autor destas linhas frequentou o 3º curso (1977/78), tendo tido o privilégio de contar como docentes principais: Manuel Rocha, José Folque, Ricardo Oliveira, Emanuel Maranha das Neves, Fernando Guedes de Melo e João Castel-Branco Falcão, todos investigadores do LNEC, e António Mineiro, Professor da UNL. Esta menção é também uma sentida homenagem do autor, que muito aprendeu com tão distintos engenheiros!

Futuros investigadores, futuros docentes universitários e do ensino politécnico, quadros de empresas de projeto e construção, quadros de empresas públicas ligadas à construção (“donas de obra”), encontraram nestes cursos uma especialização com sólida base teórica. Em especial nas primeiras edições, foi muito relevante o número de inscritos nos cursos que possuíam já significativa experiência profissional, em diversas áreas e funções, e buscavam uma nova etapa profissional baseada na Geotecnia. A influência de todos eles no progresso que a Geotecnia em Portugal experimentou nas décadas seguintes foi inestimável.

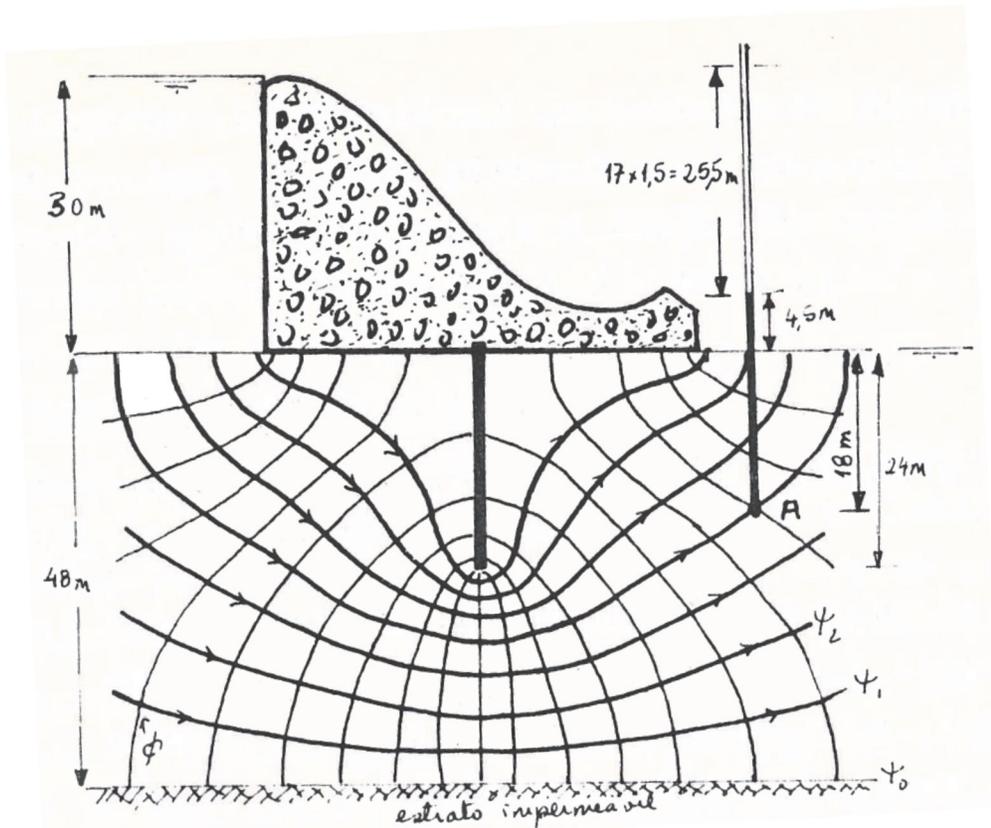


Fig. 4 – Rede de escoamento no maciço de fundação de barragem gravidade com cortina corta-águas (Mineiro, 1978).

O autor pretende expressar nesta oportunidade uma sincera homenagem ao fundador e coordenador destes cursos, Ricardo Oliveira.

É nesta década que a Licenciatura em Engenharia Civil deixa de ser exclusiva da FEUP e do IST, passando a ser ministrada igualmente pela Universidade de Coimbra (a partir do ano letivo 1972/73). É ainda em 1973 que o número de universidades públicas deixa de se restringir às Universidades de Coimbra, Lisboa e Porto, com a criação de novas universidades: a já referida Universidade Nova de Lisboa, a Universidade do Minho e a Universidade de Aveiro. Em 1979 seria fundada a Universidade de Évora.

2.5 – Década de 1980. as Universidades, finalmente!

A década de 1980 é caracterizada por um progresso generalizado no ensino da Geotecnia nas Universidades. As mais antigas escolas universitárias de Engenharia Civil (FEUP, IST e U. Coimbra) começam a constituir equipas docentes com formação geotécnica adequada e com grau de doutoramento, no país ou no estrangeiro. Numa percentagem muito significativa, esses docentes passaram pelos Cursos de Mestrado da UNL.

A FEUP é a primeira escola a criar, em 1987/88, uma Opção (ou Ramo) de Geotecnia. Tal como as opções pré-existentes, vai ocupar no essencial o 5º ano da Licenciatura em Engenharia Civil (pré-Bolonha) ou do Mestrado Integrado em Engenharia Civil (pós-Bolonha, neste caso com o último semestre dedicado à Dissertação).

A capacidade de atração de estudantes com percurso académico de elevado mérito foi, desde o início, uma característica marcante da Opção de Geotecnia. Até 2020/21 (último ano de funcionamento, conforme se explica na secção 2.8.3) formou cerca de 550 engenheiros civis com a especialização em Geotecnia. Destes, 28 estão atualmente doutorados (em Geotecnia, na sua maioria, mas também noutras áreas). O atual Diretor da FEUP é um deles. Um dos atuais Vice-Reitores da Universidade do Porto é também um deles.

É nesta década (1986) que são fundadas duas novas universidades públicas: a Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD) e a Universidade da Beira Interior (UBI).

2.6 – Década de 1990. O início da maturidade

Na década de 1990 consolidam-se as tendências da década anterior. É nesta década que praticamente todas as universidades públicas do país ministram Cursos de Engenharia Civil. Ao progresso já registado no ensino da Geotecnia, junta-se agora um progresso tangível na investigação, com o número de doutoramentos a crescer significativamente e com manifesta qualidade de nível internacional.

Merece enfática menção o Programa Ciência promovido pela FCT, logo no início da década, que dá um enorme incentivo para o equipamento dos laboratórios. As universidades começam assim a dispor de laboratórios de Geotecnia com equipamentos de qualidade e diversidade crescentes, passando a ser viáveis trabalhos de doutoramento com forte componente experimental. O apoio do LNEC a muitos destes trabalhos experimentais foi também de grande importância.

É também nesta década que a maioria dos investigadores do LNEC passa a apresentar as teses de doutoramento nas universidades, em alternativa às teses de especialista.

É criado no IST o Perfil de Geotecnia (1993) na Licenciatura em Engenharia Civil.

A empregabilidade consolida-se em articulação com a realização em Portugal de grandes obras públicas.

O VII Congresso Nacional de Geotecnia, realizado no Porto em abril de 2000, fecha, e de algum modo simboliza, uma década de grande progresso da Geotecnia: são batidos todos os recordes de eventos anteriores (participantes, trabalhos técnicos, patrocinadores).

2.7 – Década de 2000. A maturidade (e nuvens no horizonte)

A primeira década do século XXI pode caracterizar-se, de um modo geral, como uma época de Maturidade, no que diz respeito ao ensino e à investigação.

Aspeto da maior relevância são os novos Campus ou edifícios de algumas escolas e universidades inaugurados no virar da década (FEUP, U. Coimbra, U. Aveiro, UBI, FCT da UNL). Não só criaram melhores condições para o ensino, mas sobretudo garantiram espaços de laboratório e para estudantes de doutoramento, que manifestamente não existiam nas instalações anteriores.

Consolidam-se as equipas docentes, fruto dos doutoramentos realizados. Jovens doutorados encontram colocação nos novos cursos de Engenharia Civil, entretanto criados nas universidades mais recentes e nos institutos politécnicos.

Em paralelo, a capacidade laboratorial das universidades continua a reforçar-se, baseada em novos projetos de investigação e novo programa de reequipamento científico, e ainda tirando partido dos novos e maiores espaços.

Novos ramos/perfis de Geotecnia são criados (IST, U. Coimbra).

A década é também marcada pelo chamado Processo de Bolonha, que a partir do ano letivo de 2006/07 leva à criação, na maioria das universidades, dos chamados Mestrados Integrados em Engenharia Civil, em substituição das Licenciaturas em Engenharia Civil. Na prática, os cursos continuam a ter 5 anos (10 semestres), sendo a mais significativa alteração a dedicação integral do 10º semestre à elaboração de uma dissertação. A (altamente controversa) alteração do nome do grau

académico de Licenciatura para Mestrado, pelo seu simbolismo, conduziu pouco depois à descontinuação dos mestrados tradicionais.

A nível do mercado de construção e obras públicas, apesar de esta década ser marcada por grande instabilidade (picos e contrações bruscos), com reflexos negativos na empregabilidade, os cursos de Engenharia Civil mantêm elevado nível de atratividade. Por outro lado, a instabilidade do mercado interno incentivou a internacionalização de empreiteiros e projetistas, que conhece um evidente progresso.

2.8 – Década de 2010 até ao presente. A crise.

2.8.1 – *Introdução. Apuramento das teses de doutoramento realizadas em Portugal*

Desde 2010 até à atualidade concentra-se um número significativo de ocorrências e movimentos diversos e complexos, que necessitam de tratamento mais detalhado e não tanto (ou apenas) de referência em termos de tópicos, com foi feito para as décadas anteriores.

A “resultante” desses eventos levou o autor a escolher a palavra Crise para descrever este período. Todavia, sendo este o último período em apreciação, justifica-se também concentrar nesta secção alguns números acumulados referentes à investigação, em particular às teses de doutoramento.

É indiscutível que, sob o ponto de vista da investigação, se registou um progresso notável: a capacidade laboratorial e de investigação das universidades continua a reforçar-se, com crescimento substancial do número de doutoramentos.

A Figura 5 mostra a evolução do número de teses de doutoramento ao longo do período temporal abarcado neste trabalho realizadas em Portugal (Universidades e LNEC) e aprovadas nas universidades. As teses referem-se exclusivamente a temas geotécnicos, incluindo, portanto, a Mecânica dos Solos, a Mecânica das Rochas e a Geologia da Engenharia.

Da figura, estão excluídas teses de docentes de universidades portuguesas desenvolvidas no estrangeiro (estimadas em cerca de 13) e que obtiveram equivalência em Portugal. De igual modo, a figura não contabiliza coorientações da responsabilidade de docentes de universidades portuguesas

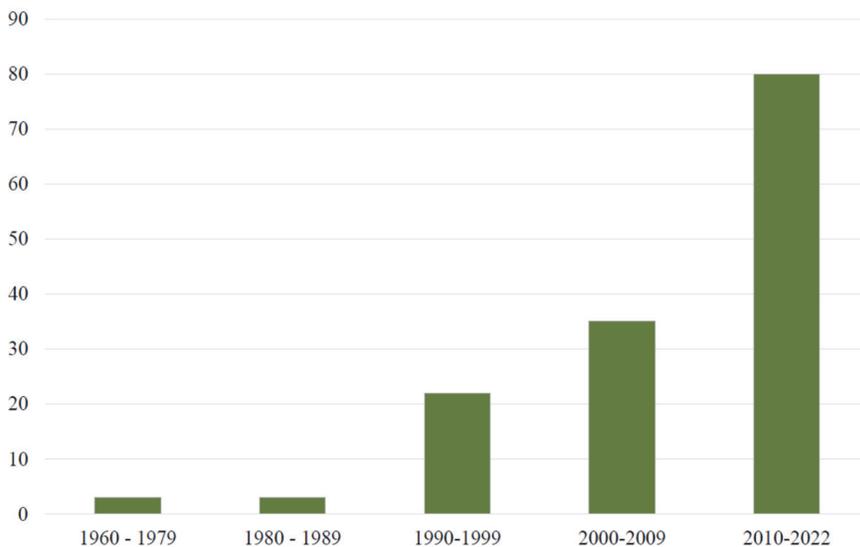


Fig. 5 – Teses de doutoramento realizadas em Portugal em temas geotécnicos – distribuição por décadas.

e do LNEC de teses de doutoramento apresentadas em universidades estrangeiras (algumas destas, parcialmente desenvolvidas em Portugal, ao abrigo de acordos de cooperação).

Por seu turno, a Figura 6 distribui as teses anteriores pelas diversas universidades. Importa observar que: i) nas universidades de Aveiro, Coimbra e Nova de Lisboa as teses consideradas englobam teses em Engenharia Civil e em Engenharia Geológica; ii) as teses na Faculdade de Ciências de Lisboa são, naturalmente, em Engenharia Geológica; iii) as teses desenvolvidas no LNEC foram maioritariamente defendidas no IST (11).

Como comentário geral, pode dizer-se que os números apresentados revelam desde o início do século XXI (no essencial nas duas últimas décadas) uma atividade muito meritória de investigação científica nos temas geotécnicos.

Uma pesquisa, que não houve oportunidade de realizar, nas bases de dados das publicações científicas muito provavelmente revelaria para este período um crescimento marcado de trabalhos publicados em revistas indexadas, atestando a qualidade da investigação.

Pode dizer-se, a propósito dos dados apresentados, que nesta vertente não parece apropriado usar a palavra Crise. Mas continuemos....

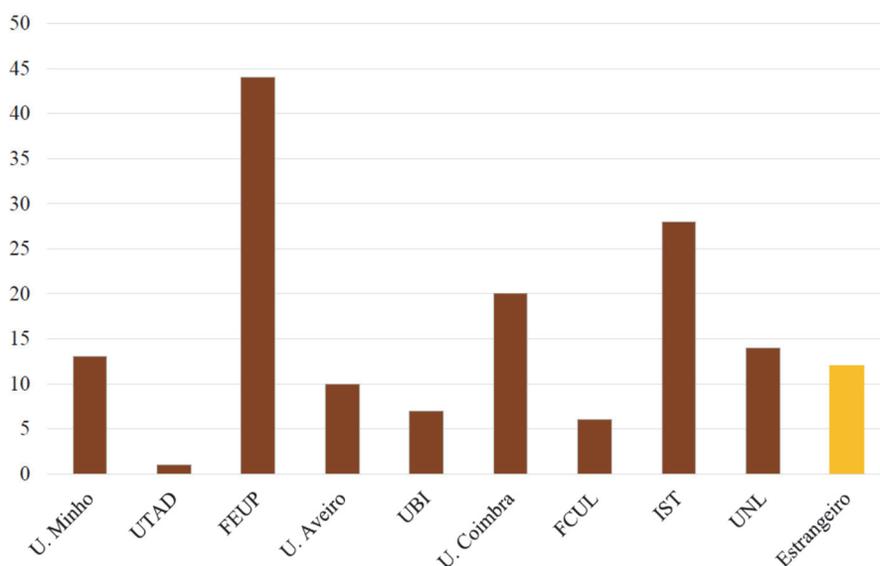


Fig. 6 – Teses de doutoramento realizadas em Portugal em temas geotécnicos até 2022 – distribuição por universidades.

2.8.2 – Redução do número de candidatos aos cursos de Engenharia Civil

Em articulação (e como consequência) da crise financeira iniciada em 2008 e da intervenção da chamada *troika* em Portugal, vai ocorrer uma redução drástica do número de candidatos aos cursos de Engenharia Civil, a partir de 2011.

A Figura 7 mostra a evolução do número de estudantes colocados nas universidades públicas nos cursos de Engenharia Civil entre 2010/11 e o presente ano letivo de 2022/23. A redução entre 2010 e 2014 foi particularmente dramática: 83%! Pode observar-se que nos últimos 7 anos o número estabilizou em perto de 400 estudantes (correspondendo a 45% do valor de 2010). Outra tendência que pode observar-se é a concentração dos estudantes em duas escolas, a FEUP e o IST: nos últimos 7 anos estas escolas admitiram, em média 66%, do total dos estudantes, quando no início da série essa percentagem era 41%.

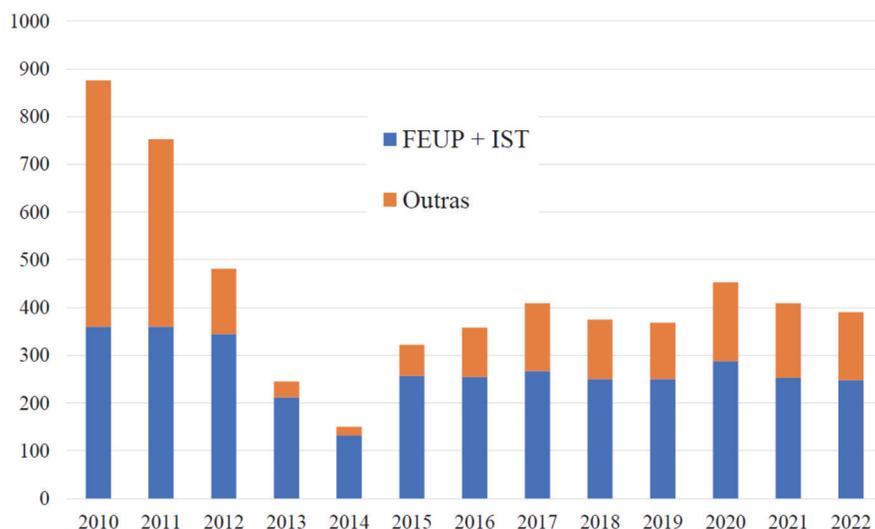


Fig. 7 – Número de estudantes colocados nos cursos de Engenharia Civil nas universidades públicas (concurso nacional) entre 2010 e 2022.

Os números apresentados não englobam os Institutos Politécnicos, no conjunto dos quais a redução do número de estudantes foi ainda mais dramática.

A tendência acima identificada associou-se um substancial aumento dos estudantes admitidos que não colocaram a Engenharia Civil como 1ª opção no processo de candidatura. A Figura 8 mostra a situação nos últimos 7 anos para a FEUP e o IST. Apesar do cenário globalmente muito desfavorável, pode notar-se uma tendência positiva ao longo da série, com um crescimento de 35% (2016) para 75% (2022).

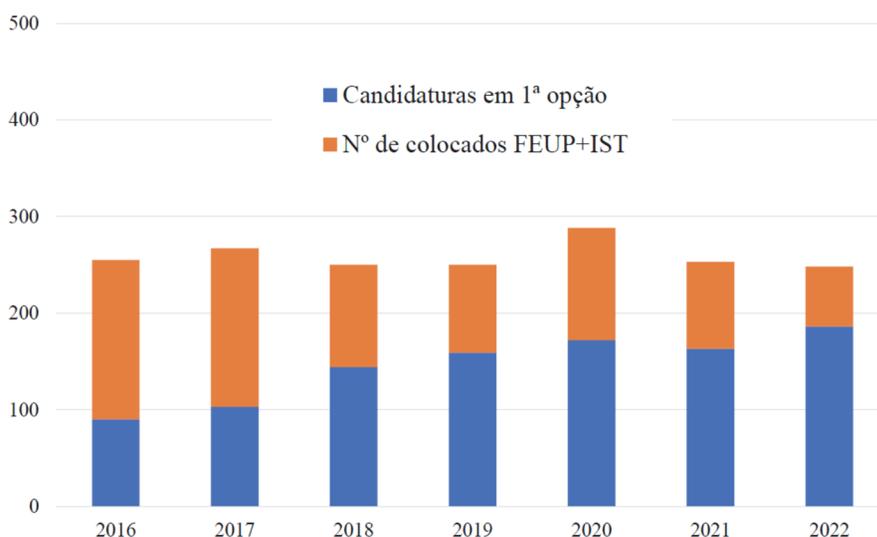


Fig. 8 – Número de estudantes colocados nos cursos de Engenharia Civil na FEUP e no IST (concurso nacional) entre 2016 e 2022 e, de entre aqueles, os que escolheram a Engenharia Civil como 1ª opção.

A redução do número de estudantes colocados e, de entre estes, os colocados em 1ª opção, teve como consequência uma redução da qualidade e da motivação (em termos gerais, naturalmente) dos estudantes.

2.8.3 – Repercussões no que respeita à formação no domínio da Geotecnia

A situação que acaba de ser apresentada acarretou necessariamente a redução do número de estudantes nos “ramos” de Geotecnia nos Mestrados Integrados em Engenharia Civil e, depois de 2021/22 (com a reforma dos MIEC em dois ciclos independentes LEC+MEC), nos Mestrados em Engenharia Civil. Aliás, a referida redução abrangeu, como se compreende, todos os ramos de especialização.

Este facto levou em algumas escolas ao “fecho” do ramo de Geotecnia, enquanto noutras conduziu à redução do número de “ramos”, com a consequente redução da oferta de unidades curriculares especializadas. Na FEUP, por exemplo, os ramos foram reduzidos para quatro, passando a existir um ramo de Estruturas e Geotecnia, no âmbito do novo plano de estudos LEC+MEC (em paralelo com os ramos de Construções, Planeamento e Transportes e Hidráulica e Ambiente).

Como se compreenderá, isso implica, para a maioria dos estudantes do ramo de Estruturas e Geotecnia, uma redução significativa do número de unidades curriculares especializadas em cada uma das áreas. No chamado “tronco comum” o espaço para uma possível compensação desta redução da especialização é nulo, tendo em conta que todas as áreas científicas experimentaram grande desenvolvimento.

Em paralelo, desenvolveram-se dois “movimentos” altamente nefastos:

- a redução do número de horas de contacto, isto é, letivas (um dos paradigmas do chamado Processo de Bolonha);
- o aumento do número de estudantes por turma, fruto das crescentes dificuldades financeiras das nossas universidades.

A conjugação destes “movimentos” com a redução do número de estudantes e com a redução do número de disciplinas especializadas, resulta numa brutal redução do número global de horas letivas, logo dos recursos humanos para tal necessários.

O Quadro 4 é exemplificativo do que acaba de ser descrito. Compara, para a FEUP, o serviço docente nas 3 unidades curriculares do chamado “tronco comum”, isto é, frequentadas por todos os

Quadro 4 – Comparação do serviço docente em disciplinas geotécnicas do tronco comum nos cursos de Engenharia Civil da FEUP em 2012/13 e 2022/23.

2012/13: MIEC	Turmas T/TP-P	Total de horas letivas/semana	2022/23: LEC+MEC	Turmas T/TP-P	Total de horas letivas/semana
Geologia de Engenharia (2º ano, 1º sem.) Horas letivas/semana: 2hT+1,5hTP+0,5hP	3/9	24	Geologia de Engenharia (LEC-2º ano, 1º sem.) Horas letivas/semana: 2hT+1hTP+0,5hP	2/7	14,5
Mecânica dos Solos 1 (4º ano, 1º sem.) Horas letivas/semana: 2hT+2hTP+1hP	4/11	41	Mecânica dos Solos (LEC-3º ano, 2º sem.) Horas letivas/semana: 2hT+1,5hTP+1hP	3/6	21
Mecânica dos Solos 2 (4º ano, 2º sem.) Horas letivas/semana: 2hT+2hTP+1hP	4/12	44	Engenharia Geotécnica (MEC-1º ano, 1º sem.) Horas letivas/semana: 2hT+1,5hTP+0,5hP	2/5	14
Total de horas por semana e por semestre	-	54,5	Total de horas por semana e por semestre	-	24,75
Docentes necessários	-	7	Docentes necessários	-	3

estudantes, nos anos de 2012/13 (MIEC) e o ano letivo de 2022/23(LEC+MEC). (Note-se que no ano 2012/13 o efeito da redução do número de estudantes não era ainda significativo nas disciplinas em causa).

O efeito conjugado da redução do número de estudantes e horas de contacto e do aumento de número de estudantes por turma, resulta que o serviço docente que em 2012/13 exigia 7 docentes, passou a exigir apenas 3 docentes em 2022/23.

Note-se que esta redução do serviço docente é agravada com a já referida redução das disciplinas especializadas (ramo).

Esta tão considerável redução do serviço docente dificulta de forma manifesta a renovação do corpo docente, tão necessária para substituir a geração de docentes que desde a década de 1980 liderou o ensino da Geotecnia.

2.8.4 – Conclusão

Do contexto fortemente negativo que acaba de ser esboçado, resultam em suma os seguintes factos:

- 1) a formação geotécnica nos nossos cursos universitários de Engenharia Civil (cursos de 3+2 anos) é hoje muito mais limitada (no que respeita aos conhecimentos/competências adquiridos) do que há uma década;
- 2) esta formação abrange tendencialmente muito menos estudantes;
- 3) a qualidade (média) desses estudantes é inferior ao passado;
- 4) o corpo docente geotécnico das universidades está numa situação de enorme fragilidade: redução de efetivos, perda de valências, por inviabilidade de significativa renovação.

Em resumo, a situação atual no ensino da Geotecnia nos cursos universitários de Engenharia Civil pode ser comparada a uma verdadeira “tempestade perfeita”. E, não obstante, as necessidades de profissionais bem formados mantêm-se e até se acentuaram!

3 – NOVO CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO-MESTRADO. UMA PROPOSTA

A situação de crise descrita na secção precedente tem-se traduzido numa substancial redução do número de engenheiros recém-formados (MEC - 2º ciclo) com vocação e pré-especialização na área geotécnica, bem como num empobrecimento da sua formação académica, em comparação com o passado.

Se nada se fizer, a situação tende a agravar-se, com consequências inevitáveis na degradação da prática geotécnica das nossas empresas de projeto e construção.

A gravidade da situação e a fragilidade atual das nossas universidades e empresas reclamam uma especial concertação de esforços para enfrentar este desafio.

Pensa o autor que se justifica montar com urgência um projeto de formação pós-2º ciclo (atuais mestrados oficiais de carácter generalista, que na realidade pouco diferem das Licenciaturas pré-Bolonha), que consistiria num Curso de Especialização-Mestrado em Engenharia Geotécnica. Na prática, seria um curso capaz de conferir uma formação aprofundada na área geotécnica, que poderia ou não conferir grau de Mestre, conforme se explica adiante. Este curso seria especialmente dirigido para os recém-formados com o 2º ciclo generalista de Engenharia Civil (MEC) das universidades e politécnicos com gosto especial pela área da Geotecnia, para os quadros das nossas empresas, e teria ainda a ambição de captar estudantes internacionais.

Para o sucesso deste projeto de formação, seria altamente conveniente satisfazer as seguintes condições de partida:

- envolver todas as Universidades e ainda os Institutos Politécnicos;
- contar com o apoio institucional e a participação do LNEC;
- montar um corpo docente rigorosamente selecionado entre os melhores docentes e investigadores;

- assegurar uma Direção e uma Comissão Científica altamente motivadas;
- garantir um forte envolvimento das Empresas.

Este envolvimento das Empresas seria especialmente importante, nomeadamente, para: i) o encorajamento à participação dos seus quadros; ii) a facilitação de visitas técnicas; iii) a elaboração de dissertações em ambiente empresarial; iv) a colaboração na docência; v) o financiamento de um prémio anual para o melhor desempenho escolar ou a melhor dissertação.

Como características definidoras do curso, adianta-se algumas ideias:

- o curso teria três semestres: os dois primeiros dedicados à parte curricular, correspondentes à Especialização, e um terceiro semestre para os estudantes que entendessem realizar uma Dissertação, que conferiria o Grau de Mestre em Engenharia Geotécnica;
- as aulas teriam carácter presencial e *online*, sendo este ponto aplicável a estudantes e docentes;
- as aulas seriam lecionadas em língua portuguesa, focando o curso no mercado nacional, nos países lusófonos e da América Latina;
- deveria ser posta uma forte tónica na Especialização, de modo a encorajar a participação dos quadros das empresas; a Dissertação poderá (ou não) vir a seguir, e poderá (deverá) ser feita em ambiente empresarial;
- o curso seria sedado na Universidade de Coimbra, de modo a minimizar a escala das deslocações dos docentes e também os custos de alojamento dos estudantes.

Justificam-se ainda algumas breves observações, antes de concluir este ponto. Projeto análogo de curso de mestrado único no País já foi ponderado na década de 1990, mas a ideia foi abandonada fundamentalmente devido às dificuldades de deslocação por parte dos docentes (na altura esse curso seria sedado em Lisboa). Na sequência dessa discussão, acabaram por surgir dois cursos envolvendo parcerias: o Curso de Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, colaboração da FEUP com a FCTUC (1ª edição em 1998/99) e o Curso de Mestrado em Geotecnia para Engenharia Civil, com a colaboração da FCTUNL, IST e LNEC (1ª edição em 2002/03). Como já foi mencionado, estes cursos foram descontinuados pouco após a criação dos MIEC (Mestrados Integrados em Engenharia Civil), na sequência da aplicação do Processo de Bolonha (2006/07).

Para além de tudo o que acima foi exposto acerca do contexto presente, deve reconhecer-se que as aulas *online*, que a recente pandemia veio generalizar, são um fator importante de viabilização da proposta. Acresce que, num prazo que se deseja não dilatado, as deslocações em comboio rápido facilitarão a docência presencial. É mais uma razão que reforça a localização na Universidade de Coimbra como a mais conveniente.

4 – ACERCA DA DATA DE FUNDAÇÃO DA SPG. UMA PROPOSTA

Este Seminário foi realizado por ocasião dos “50 anos da SPG”.

O autor destas linhas teve oportunidade de transmitir à Direção da SPG a sua discordância com a designação desta efeméride. Em rigor, a data do Seminário não corresponde a 50 anos da fundação da associação que reúne os geotécnicos portugueses. Corresponde tão só a 50 anos de um ato puramente administrativo que atribuiu à associação que reunia os geotécnicos portugueses o nome atual de Sociedade Portuguesa de Geotecnia.

É comum em inúmeras instituições mais ou menos antigas (associações técnicas como a nossa, departamentos do Estado, instituições de ensino e de investigação, etc.) alterarem o seu nome, pelas mais diversas razões, por vezes, deve reconhecer-se, nem sempre devidamente justificadas.

Permita-se ao autor destas linhas invocar o exemplo da sua instituição: a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Em 13 de janeiro de 1837 foi fundada no Porto, pelo governo saído da revolução liberal, presidido por Passos Manuel, a Academia Politécnica, destinada, em particular, a formar os

“engenheiros civis” de que o progresso do País tanto necessitava. Com sucesso e competência variáveis, aquela Academia cumpriu a sua função até 1911, quando o governo da (jovem) República fundou a Universidade do Porto e sedeu a sua Reitoria e parte dos seus cursos no próprio edifício da Academia Politécnica. Em particular, os cursos de Engenharia, com os seus docentes, estudantes e laboratórios, continuaram aí a funcionar, não obstante, devido à grande instabilidade política da época, a faculdade destinada aos engenheiros ter sido formalmente criada apenas em 1915, com o nome de Faculdade Técnica da Universidade do Porto. Em 1926 é decidida, pelo governo da Ditadura saído do 28 de maio, a mudança do nome da escola, que passou a denominar-se, até hoje, Faculdade de Engenharia.

Citando a própria Universidade do Porto, no seu sítio oficial, “*a instituição manteve os mesmos objectivos/fins, sustentados pela continuação da estrutura orgânico-funcional criada para os concretizar. Não estamos, portanto, perante o relato da ocorrência de uma ruptura sistémica, protagonizada pelo desaparecimento de uma instituição e o nascimento de outra*”.

Pelos motivos invocados, o Dia da FEUP celebra-se a 13 de janeiro, data do decreto que criou em 1837 a Academia Politécnica. Considerar 1926 como o ano da sua fundação seria deitar fora 89 anos de história da instituição.

Exemplos como este são inúmeros e um deles é a associação que congrega os geotécnicos portugueses, hoje SPG!

Atrás foi referida a participação de Manuel Rocha no 2º Congresso da ISSMFE, realizado em 1948, em Roterdão, e como essa participação terá sido marcante para o próprio.

Neste congresso foram aprovados os estatutos daquela associação internacional, e incentivada a criação de sociedades nacionais filiadas naquela. No Brasil, cuja participação naquele congresso foi bem mais robusta do que a portuguesa, essa criação ocorreu logo em 1950, presidida por Milton Vargas, sob o nome de ABMS – Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, aliás hoje designada por Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Sayão, 2010). Com toda a naturalidade e legitimidade, a ABMS comemorou os seus 70 anos em 2020.

Quando se pondera a data da fundação de um grupo ou associação uma eficaz “pedra de toque” é averiguar até que ponto os putativos membros da mesma *se reconhecem entre si e, externamente, são reconhecidos como tal*.

Os documentos disponíveis, permitem responder a esta questão, pois conhecemos a constituição da Comissão de Mecânica dos Solos da Ordem dos Engenheiros, já ativa em 1951, e responsável pelo curso de formação em Mecânica dos Solos, realizado em 1952. Não podemos deixar de ver na criação desta comissão a influência da participação de Manuel Rocha, seu Vice-Presidente, no referido Congresso de Roterdão da ISSMFE.

Naquela comissão, já apresentada no Quadro 1, podem reconhecer-se diversos Presidentes e membros destacados, nas décadas seguintes, da nossa associação. Esta passou, sucessivamente, pelas designações de Agrupamento Português de Mecânica dos Solos, já fora do âmbito da Ordem dos Engenheiros, Agrupamento Português de Mecânica dos Solos e das Rochas (na sequência da consagração da Mecânica das Rochas como disciplina autónoma, dentro do que passava já a designar-se por Geotecnia, e da necessidade de filiação na recentemente criada ISRM – *International Society for Rock Mechanics*) e, finalmente, em 1972, por Sociedade Portuguesa de Geotecnia (também na sequência da consagração da Geologia da Engenharia, e da necessidade de filiação na IAEG, *International Association for Engineering Geology*) (Moura Esteves, 2008).

Por todas as razões apontadas, parece legítimo afirmar que foi por ocasião da formação da Comissão de Mecânica dos Solos, isto é, no ano de 1951, que foi fundada a associação dos geotécnicos portugueses, hoje reconhecida pelo nome de Sociedade Portuguesa de Geotecnia. O curso de formação em Mecânica dos Solos, que aquela comissão teve a responsabilidade de organizar em 1952, poderá ser considerado o primeiro evento público e nacional de cariz geotécnico no nosso País.



Fig. 9 – Membros da Comissão de Mecânica dos Solos de 1951 (a ordem é a indicada no Quadro 1)

Estas considerações não põem, de modo algum, em causa a relevância e a oportunidade do Seminário “A Geotecnia como Referência da Engenharia Portuguesa” – que foi aliás generalizadamente considerado como um sucesso – mas tão só a implícita referência, através dos meios de divulgação, que o mesmo se enquadrava na comemoração dos “50 anos da Sociedade Portuguesa de Geotecnia”.

Parece óbvio que está instalada uma controvérsia sobre a data de fundação da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, que seria bom, pelo simbolismo que tal assume em instituições nobres e antigas como a nossa, resolver.

Uma possibilidade seria promover a discussão do assunto num fórum com ampla participação, por exemplo, numa sessão especial do Congresso Nacional de Geotecnia. Essa discussão deveria ser devidamente preparada, de modo a facilitar o alcance de um consenso informado e alargado.

Isso permitiria, por exemplo, a elaboração de uma moção pela Direção em funções, a levar a uma Assembleia Geral, que consagrasse, fundamentada e definitivamente, o entendimento dos sócios quanto à data de fundação da sua agremiação. A página oficial da SPG seria então ajustada de modo a refletir o conteúdo daquela moção.

É esta a proposta do autor, com que se encerra o presente trabalho, juntando, a título de homenagem, na Figura 9 as fotografias daqueles que podem ser legitimamente considerados como os pioneiros da Geotecnia em Portugal.

5 – AGRADECIMENTOS

O autor expressa a sua gratidão aos que amavelmente colaboraram na preparação deste trabalho por meio do fornecimento de informações e dados das respetivas instituições, nomeadamente (e por ordem alfabética): Alexandra Marques (OE), Alice Freitas (OE), Ana Paula Silva (FCUNL), Eduardo Fortunato (LNEC), Hélder Chaminé (ISEP-IPP), Isabel Fernandes (FCUL), Jorge Almeida e Sousa (FCTUC), Jorge Liça (OE), Jorge Pópulo (FEUP), José Eduardo Menezes (FEUP), José Mateus de Brito, Luís Lamas (LNEC), Luís Miguel Costa (FEUP), Margarida Pinho Lopes (UA), Nuno Guerra (FCTUNL), Palmira Pires (OE), Paulo Ramos (T. Duarte - OE), Rafaela Cardoso (ISTUL), Ricardo Oliveira (LNEC), Teresa Santana (FCTUNL), Tiago Miranda (UM) e Victor Cavaleiro (UBI).

O autor agradece o apoio do CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções, Unidade de Investigação apoiada pelo Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e pelo Financiamento Programático - UIDP/04708/2020, através da FCT/MCTES (PIDDAC).

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barreiros Martins, J. (1965). *Capacidade de Carga de Fundações*. Tese de Doutoramento, FEUP.
- Correia de Araújo, F. (1942). *Estudo dos Maciços Terrosos e dos seus Suportes*. Edições Lopes da Silva, 323 páginas, Porto.
- Maranha das Neves, E. (2018). *Manuel Rocha*, Academia de Engenharia, Lisboa.
- Mineiro, A. J. C. (1978). *Mecânica dos Solos e Fundações*, 553 páginas, Universidade Nova de Lisboa.
- Moura Esteves, J. (2008). *Sociedade Portuguesa de Geotecnia. Percurso histórico de vida, de 1951 a 1983*. Arquivo da SPG.
- OE (1955). *Curso de Mecânica dos Solos*, Secção de Engenharia Civil, Comissão de Mecânica dos Solos, Ordem dos Engenheiros, 555 páginas, Lisboa.

- Pimentel dos Santos, M. (1949). *A Mecânica do Solo e as suas Aplicações*. Sociedade de Estudos da Colónia de Moçambique, Separata do Boletim nº 61 – Abril a Junho de 1949, 330 páginas, Moçambique.
- Rocha, M. (1971). *Mecânica das Rochas*, 460 páginas, LNEC.
- Sayão, A. (2010). *História da Engenharia Geotécnica no Brasil*. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, ABMS.
- Schultz, E. (1943). *Application de la Mécanique du Sol*. Revista da Faculdade de Engenharia, 90 páginas, Vol. IX, n.ºs 3 e 4, Porto.

O PROJETO CÁPSULA DO TEMPO E A HISTÓRIA DA GEOTECNIA EM PORTUGAL

Heritage time capsule project and Portuguese geotechnics history

José A. Mateus de Brito^a

^a Consultor geotécnico, Ex-TPF, Portugal.

RESUMO – No âmbito do projeto Heritage Time Capsule, da International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), a Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG) tem vindo a desenvolver ações relativas à História da Geotecnia em Portugal. Descrevem-se os objetivos do projeto e as ações já desenvolvidas. Apresentam-se os principais aspetos da contribuição dada pela Sociedade Portuguesa de Geotecnia e descreve-se, de forma sucinta, a história da geotecnia em Portugal nos últimos 100 anos. Explicitam-se os acontecimentos que influenciaram a evolução histórica, dando relevo às contribuições geotécnicas que foram determinantes nessa evolução, não só da conceção e projeto, mas também das técnicas construtivas dos vários tipos de obras geotécnicas portuguesas.

ABSTRACT – Within the scope of the Heritage Time Capsule project, from the International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), the Portuguese Geotechnical Society (SPG) has been developing actions related to the History of Geotechnics in Portugal. The objectives of the project and the actions already carried out are described, the main aspects of the contribution given by SPG and the most relevant aspects of the development of geotechnics in Portugal in the last 100 years are presented, explaining the events that influenced the development of geotechnics and emphasizing the geotechnical aspects that were determinant of the evolution not only of the conception and design, but also of the construction techniques of the various types of portuguese geotechnical works.

Palavras Chave – História da geotecnia portuguesa, obras geotécnicas portuguesas, património geotécnico.

Keywords – Portuguese geotechnical history, Portuguese geotechnical works, Heritage Time Capsule project.

1 – PROJETO CÁPSULA DO TEMPO

1.1 – Introdução

O Projeto TCP foi promovido pela International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE Time Capsule Project) com o objetivo de criar uma Cápsula do Tempo do Património da ISSMGE designada Heritage Time Capsule (HTC). A HTC é basicamente um conjunto de contribuições de indivíduos e de grupos associados da ISSMGE, reunidas de 2021 a 2023, que visa mostrar a história e os objetivos atuais da ISSMGE, sendo concebida para ser útil para as gerações presentes e futuras de cientistas e engenheiros geotécnicos. O Projeto TCP destina-se a recolher os principais marcos da contribuição e do desenvolvimento da geotecnia em cada país, a nível nacional e no mundo. No âmbito deste projeto, a SPG, tal como todas as outras sociedades membros da ISSMGE, foi convidada a dar o seu contributo. A SPG considerou ser esta uma oportunidade única para divulgar as realizações e o estado atual da engenharia geotécnica

E-mail: jmateusdebrito@gmail.com

portuguesa, bem como de antever e de preparar o futuro. Este artigo constitui o desenvolvimento da intervenção feita pelo autor no seminário “A geotecnia como referência da engenharia portuguesa” comemorativo dos 50 anos da SPG e dos 75 anos do LNEC), que se realizou em Lisboa, no LNEC, em 24 e 25 de novembro de 2022.

1.2 – Objetivos

Foi definido que as contribuições deveriam incluir material para suportar, explicar e destacar o desenvolvimento da engenharia geotécnica nos diversos países e a história da respetiva sociedade nacional, nomeadamente:

- o que foi alcançado pela engenharia geotécnica e quais as condições sociais que o motivaram;
- o papel extremamente influente desempenhado pela educação académica e pela investigação;
- as áreas de contribuição relevante, os projetos exemplares e as personalidades envolvidas;
- o desenvolvimento de técnicas e tecnologias geotécnicas próprias de cada nação;
- o histórico de casos de sucesso ou de fracasso, com as lições aprendidas, e o que é que não pôde ser alcançado;
- o desenvolvimento de normas ou de investigações que contribuíram para a melhoria de boas práticas no exercício da profissão;
- a aprendizagem com os eventos extremos que marcaram a prática profissional;
- os novos caminhos a serem explorados e o desenvolvimento de novas oportunidades;
- a eliminação da lacuna entre a profissão e a academia, envolvendo mais os jovens engenheiros geotécnicos;
- o incremento do perfil da engenharia geotécnica e a promoção de futuros líderes.

O TCP solicitou a contribuição das 90 Sociedades Filiadas da ISSMGE, de 38 Comitês Técnicos, do Grupo Presidencial de Jovens Membros e dos Associados Corporativos da Indústria e definiu as regras abrangentes e as etapas a serem seguidas por todas as sociedades. Após uma progressiva promoção a partir de dezembro de 2021, foi feito o lançamento formal na 20ª ICSMGE, que decorreu em Sidney, em maio de 2022, e criada a plataforma online para reunir e fornecer a herança comum a todos os engenheiros geotécnicos.

1.3 – Sessão TCP na 20ª ICSMGE

Na sessão dedicada ao TCP na 20ª ICSMGE foi relatada a evolução do processo do TCP, por Charles MacRobert, foi realizada uma conferência por Harry Poulos, intitulada “Geotechnics - The Long View”, e uma apresentação da Sociedade Australiana de Geotecnia. Foi, ainda, criado o sítio da Internet dedicado à HTC, (<https://www.issmge.org/the-society/time-capsule>), onde se incluem todos os documentos produzidos. Este sítio contém três partes:

- Parte A, com as contribuições das Sociedades Filiadas (responderam 28 das 90), das Comissões Técnicas e de Associados Corporativos da Indústria;
- Parte B, dedicada às contribuições dos ex-presidentes da ISSMGE (há 18 ex-presidentes de 1936 a 2023), bem como de várias personalidades, vice-presidentes regionais e membros de algumas Comissões ao nível da Direção da ISSMGE;
- Parte C, que foi relançada em 2023, para contribuições provenientes de descobridores (cientistas e engenheiros geotécnicos que queiram comentar as contribuições dadas e o futuro da geotecnia), para apresentação das conclusões de sessões de conferências da ISSMGE dedicadas ao HTC e para comunicações de especialistas.

2 – CONTRIBUIÇÃO DA SPG

2.1 – Objetivos

A SPG definiu os seguintes objetivos para a sua contribuição para o projeto HTC:

- divulgar a herança do património cultural, científico e tecnológico, mostrando o que há de importante na história da geotecnia portuguesa, catalisando, assim, o interesse dos geotécnicos, especialmente dos mais novos, e contribuindo para eliminar a lacuna entre a profissão e a academia;
- evidenciar, a par do desenvolvimento da geotecnia portuguesa, o papel da engenharia civil e do desenvolvimento social, económico e político do país;
- apresentar os casos de obras mais sugestivos, que evidenciam, através das correspondentes soluções, o desenvolvimento e a caracterização da cada um dos estágios dos conhecimentos científicos e das técnicas construtivas;
- evidenciar os sucessos e mostrar os fracassos do passado;
- envolver um vasto número de geotécnicos das áreas de investigação, do ensino, dos laboratórios, dos estudos e projetos, dos construtores e dos decisores, incluindo desde os seniores aos jovens profissionais, por forma a cobrir vasta abrangência de conhecimentos.

A SPG desenvolveu os seguintes tópicos como base da contribuição portuguesa:

- Pilares da Geotecnia Portuguesa;
- Obras geotécnicas relevantes portuguesas, no país e no estrangeiro;
- História da Geotecnia Portuguesa;
- Futuro da Engenharia Geotécnica em Portugal.

2.2 – Pilares da geotecnia portuguesa

Consideraram-se representativos da atividade da engenharia geotécnica nacional os seguintes pilares:

- Ensino e investigação geotécnica - Evolução do ensino e da investigação geotécnica nas universidades e instituições de investigação;
- Associações geotécnicas, eventos e publicações - Evolução das associações geotécnicas, principais eventos geotécnicos portugueses e eventos geotécnicos internacionais que ocorreram em Portugal;
- Empresas de consultoria geotécnica - História e principais realizações das principais empresas de consultoria do passado e do presente;
- Empreiteiros de obras geotécnicas - História e principais realizações dos principais empreiteiros do passado e do presente;
- Personalidades geotécnicas do passado - Apresentação da importância do trabalho de algumas personalidades geotécnicas que foram decisivas para a engenharia geotécnica portuguesa.

Alguns dos documentos relativos aos pilares estão concluídos e disponíveis no site da SPG.

2.3 – Obras geotécnicas relevantes portuguesas no país e no estrangeiro

Para a elaboração das informações sobre as obras geotécnicas relevantes, estas foram agrupadas nos seguintes tipos:

- Barragens e reservatórios em aproveitamentos hidroagrícolas;
- Barragens em aproveitamentos hidroelétricos;
- Infraestruturas de transporte;
- Fundações;

- Obras subterrâneas;
- Tratamento de terrenos;
- Escavações em meio urbano;
- Obras de suporte e estabilização de taludes;
- Obras marítimas, fluviais e de adução;
- Indústria do ambiente;
- Explorações mineiras;
- Reabilitação de obras geotécnicas.

As fichas elaboradas para as obras geotécnicas estão disponíveis no site da SPG.

2.4 – História da geotecnia portuguesa

2.4.1 – Princípios que presidiram à organização do texto da história

Não se pode falar no desenvolvimento da geotecnia sem falar em engenharia civil e no desenvolvimento social, económico e político em Portugal e no estrangeiro. Por isso, a par com a evolução da geotecnia, considerou-se ser relevante mencionar os aspetos mais marcantes da evolução da engenharia civil e introduzir alguns acontecimentos determinantes do desenvolvimento de Portugal e algumas referências internacionais relevantes. Das obras geotécnicas foram escolhidas aquelas que, pelas suas condições geológicas e geotécnicas, traduzem aspetos relevantes e inovadores. A história da geotecnia refere-se ao período posterior ao século XVIII, tendo sido dividida em períodos de tempo pertinentes. Por cada período de tempo, começa-se por situar os acontecimentos que influenciaram o desenvolvimento da geotecnia, descrevendo-se, de seguida, quando aplicável, a evolução havida por cada tipo de obras geotécnicas.

2.4.2 – Organização do texto da história

O texto com os aspetos dominantes do desenvolvimento do conhecimento científico da geotecnia portuguesa, inclui a descrição do desenvolvimento geral e da evolução da geotecnia portuguesa nas principais áreas do ensino, investigação, projeto, construção, personalidades relevantes, eventos e publicações. Em cada período de tempo são apresentados os acontecimentos que influenciaram o desenvolvimento da geotecnia e a evolução dos vários tipos de obras geotécnicas. O texto é dividido em duas partes, a saber:

Parte 1 - Início da engenharia civil em Portugal e seu desenvolvimento até à década de 1940.

- 1.1 - Primeira metade do século XIX. Criação dos cursos de engenharia civil.
- 1.2 - Segunda metade do século XIX. Desenvolvimento das redes de estradas e dos caminhos de ferro.
- 1.3 - Primeiro quartel do século XX. Monarquia Constitucional e I República. Criação do IST. Desenvolvimento das obras portuárias.
- 1.4 - 1926-1939. Da implantação do Estado Novo até ao início da II Guerra Mundial. Início do desenvolvimento das grandes barragens.
- 1.5 - Década de 1940. A viragem da guerra. Os novos rumos da eletrificação e da industrialização. A constituição do LNEC.

Parte 2 - Início da geotecnia no contexto da engenharia civil em Portugal na década de 1950 e seu desenvolvimento até á década de 2010.

- 2.1 - Década de 1950. Os caminhos da modernização. Início do período de maioria da engenharia.
- 2.2 - Década de 1960. Surgimento de grandes empresas de projeto e de consultoria.
- 2.3 - Década de 1970. Democracia e viragem para a Europa.
- 2.4 - Década de 1980. Surgimento dos fundos comunitários.
- 2.5 - Década de 1990. Grande desenvolvimento das obras públicas.

2.6 - Década de 2000. Incremento da internacionalização da engenharia portuguesa.

2.7 - Década de 2010. Retração do investimento público.

No site da SPG já está disponível, desde 2022, uma versão reduzida da história da geotecnia.

Refere-se que a primeira contribuição para a história da geotecnia em Portugal data de 17 de novembro de 1987 numa conferência proferida por Úlpio Nascimento na Ordem dos Engenheiros (Úlpio Nascimento, 1990).

2.5 – Futura contribuição da SPG

A futura contribuição da SPG passará pelo envolvimento de um maior número de geotécnicos (académicos, consultores e empreiteiros) na elaboração de fichas de outros projetos relevantes, designadamente dos concluídos antes de 1980. Incluirá, ainda, a elaboração de documentos relativos ao ensino e à investigação, aos laboratórios de geotecnia, às personalidades em geotecnia e ao futuro da geotecnia em Portugal.

3 – ASPETOS MAIS RELEVANTES DA HISTÓRIA DA GEOTECNIA PORTUGUESA NOS ÚLTIMOS 100 ANOS

3.1 – 1926-1939. Da implantação do Estado Novo até ao início da II guerra mundial. Início do desenvolvimento das grandes barragens

O ano de 1926 ficou assinalado pela instauração da ditadura militar que substituiu o regime republicano em vigor desde a queda da monarquia. O Estado Novo instalou-se na década de 30 e ficou até à década de 70, impondo a sua política de condicionamento industrial às obras públicas, como aposta de fomento económico e combate ao desemprego. Verificou-se a ascensão e afirmação dos engenheiros e da engenharia e da política da edificação de infraestruturas.

Com a criação da Junta Autónoma das Obras de Hidráulica Agrícola (JAHOA) em 1930, a ação estatal sofreu um impulso decisivo, não só pelos projetos a partir daí elaborados, mas também pelas realizações que se sucederam.

Em 1932 foi criado o Ministério das Obras Públicas e Comunicações, sob a direção de Duarte Pacheco (1900-1943), dando início a um período de avultados investimentos em infraestruturas. É sob a sua orientação, que se constroem os edifícios do Instituto Superior Técnico, que viria a constituir o primeiro campus universitário português (concluído em 1935), considerada a primeira grande obra pública moderna. O contexto tornou-se favorável para as empresas construtoras, tendo sido constituídas as seguintes empresas: Opcá (1932), Seth (1933), Rodio (1937) e Fundações Franki (1938). No domínio das empresas de sondagens e fundações, alguns engenheiros civis já vinham a mostrar interesse, desde a década anterior, pelas novas técnicas de amostragem e de ensaios “in situ”, destacando-se Henrique Leitão e Ricardo Esquivel Teixeira Duarte.

Em 1935 foi promulgada a lei n.º 1914 da Reconstituição Económica, com o fim de serem estabelecidos os planos e projetos fundamentais de obras a executar até 1950, aparecendo o povoamento interior em ligação estreita com a hidráulica agrícola. Logo em 1938 é aprovado o Plano de Estudos e Obras de Hidráulica Agrícola e da produção de energia elétrica associada.

Assiste-se a um desenvolvimento evidente do setor mineiro, com a aprovação da legislação estruturante e a intensificação do estudo sistemático das reservas existentes. Em 1930 é promulgada a Lei Geral de Minas e em 1939 é aprovada a Lei do Fomento Mineiro, com o objetivo de proceder ao reconhecimento e pesquisa dos recursos minerais em Portugal. Tomaram um certo impulso as minas de carvão de S. Pedro da Cova. Na faixa piritosa alentejana os jazigos de cobre eram explorados por poderosas companhias estrangeiras. Nas minas da Panasqueira a interseção em profundidade de novos filões de volfrâmio, muito mais ricos que os cimeiros, vieram a proporcionar a grande expansão da mina.

As obras com intervenção mais relevante da geotecnia no período de 1926 a 1939 foram: o Caminho de Ferro de Benguela, em Angola (1931), as novas estradas nacionais, incluindo a Estrada Marginal Lisboa-Cascais (1937), as obras nos Portos de Lisboa e de Leixões e numa dezena de outros portos, o Arsenal do Alfeite (1931), o Molhe da Pontinha no Funchal (1933), a ampliação dos Portos da Beira (1932), em Moçambique, e do Lobito (1934), em Angola, o Canal do Tejo para o Abastecimento de Água a Lisboa (1933), o porto de Vila Real de Santo António (1935), as barragens de Magos (1938) e de Guilhofrei (1938) e o aeroporto de Lisboa (1940).

O Caminho de Ferro de Benguela, entre o Lobito e o Catanga, com 1 347 km de extensão, foi uma das maiores linhas férreas da época e uma das grandes artérias do comércio da África Meridional.

Em 1928 é promulgado o novo Plano Rodoviário e entre 1930 e 1939 são construídos mais de 500 km de novas estradas nacionais, merecendo referência especial a estrada marginal Lisboa-Cascais, pelos seus peculiares objetivos e dificuldades de construção. Promoveu-se a pavimentação com macadame betuminoso por semipenetração, com o qual, a partir de 1936, se harmonizou a pavimentação da maioria das estradas portuguesas, localizadas sobretudo a sul do rio Tejo.

Após o lançamento do primeiro Plano de Portos em 1929, foram construídos o molhe da Pontinha no Porto do Funchal e o cais acostável do Porto de Vila Real de Santo António. No primeiro foi utilizado um sistema de caixões em betão armado, considerado como sendo de uma notável conceção técnica, pela primeira vez realizada no país. No segundo foi utilizada a técnica de cravação por havage, que consistiu no afundamento de caixões de betão simples, abertos e biselados na sua base, por escavação no interior (Figura 1). Os caixões, com uma seção de 6,0 m por 4,0 m, atingiram a profundidade máxima de 20 m. O cais acostável, com 300 m de extensão, é constituído por abóbadas de betão simples.

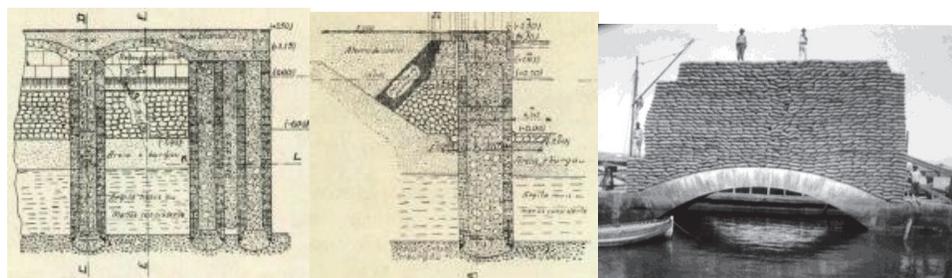


Fig. 1 - Seções transversal e longitudinal (Abecassis, 1939) e ensaio de carga com sacos de areia do porto de Vila Real de Santo António (arquivo Teixeira Duarte).

Incluído no plano de Fomento Hidroagrícola, coube à JAOHA o mérito de ter projetado a barragem de terra de Magos no Paúl de Magos, iniciada em 1935 e concluída em 1938, que se pode considerar a primeira barragem de terra homogénea em Portugal. A barragem é de terra “cilindrada” com uma altura acima da fundação de 17 m e desenvolvimento no coroamento de 695 m e um volume de terras de 300 000 m³. Tem um revestimento betuminoso no paramento de montante.

A barragem de Guilhofrei (Figura 2), do tipo gravidade em alvenaria de pedra, de planta curva, com 49 m de altura máxima, 190 m de desenvolvimento do coroamento e volume de 55 000 m³, no aproveitamento do rio Ave, foi, à data, a barragem portuguesa mais alta e a primeira a ser projetada por engenheiros estrangeiros, neste caso por Alfred Stucky (1862-1969), que também acompanhou a sua construção. Esta obra marca o início da tendência para recorrer à técnica estrangeira nas barragens destinadas a aproveitamentos hidroelétricos, sendo sintomática da importância que os engenheiros estrangeiros assumiram nos primeiros projetos desta envergadura.

Os principais agentes de mudança de 1926 a 1939 foram:

- a promulgação do novo Plano Rodoviário e a construção de novas estradas nacionais;

- o lançamento do primeiro Plano de Portos e a construção e melhoramento dos portos nacionais;
- a criação da JAOHA e o início da construção dos aproveitamentos hidroagrícolas;
- a promulgação da Lei Geral de Minas, a aprovação da Lei do Fomento Mineiro e o impulso da exploração das minas de carvão, de cobre e de volfrâmio;
- a constituição das primeiras grandes empresas de construção.

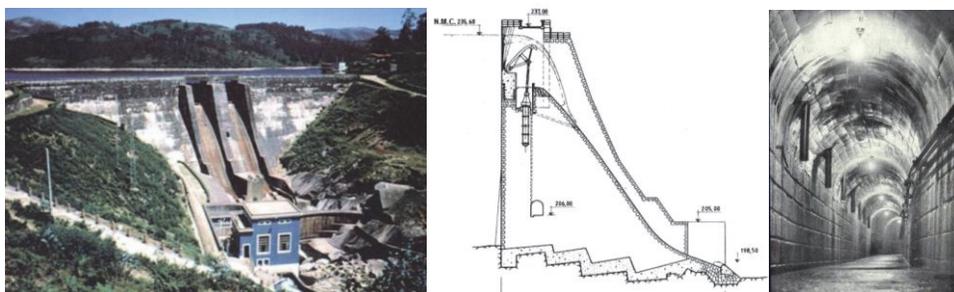


Fig. 2 - Vista de jusante e corte transversal da barragem de Guilhofrei e galeria de drenagem da barragem com seção 2,0 m x 2,5 m (capa da Revista Técnica 179, janeiro 1948).

3.2 – Década de 1940. A viragem da guerra. Os novos rumos da eletrificação e da industrialização. A constituição do LNEC

Na década de 1940 realizaram-se obras públicas muito importantes, com uma componente dominante de engenharia civil, na sequência ao período de intensa construção que já se vinha a verificar desde o início da década anterior, em especial nos domínios dos aproveitamentos hidráulicos e hidroelétricos e das infraestruturas de transportes, tanto na Metrópole, como no Ultramar. O investimento era visível, a engenharia civil afirmava-se e a construção começava a ser uma indústria com lugar destacado na economia da nação. Onde se faziam mais sentir as deficiências do país era ao nível do projeto e da investigação (Nascimento, 1990).

Com base na Lei da Eletrificação Nacional de 1944, onde se definiu com precisão a produção centralizada e a expansão da rede de transporte de energia, iniciou-se o programa hidroelétrico nacional com o aproveitamento dos grandes recursos hidrográficos do Zêzere, do Cávado e do Tejo. As Empresas Hidroelétricas do Cávado e do Zêzere criaram os seus próprios gabinetes de projeto e deram início à construção dos dois primeiros grandes aproveitamentos hidroelétricos de Castelo do Bode e de Venda Nova.

A participação de Portugal no Plano de Recuperação Europeia, conhecido como Plano Marshall (1947) e a sua adesão, em 1948, à Organização Europeia de Cooperação Económica, marcaram o princípio de uma estreita cooperação com os países da Europa Ocidental e com os EUA. Do Plano Marshall conseguiu-se um montante muito significativo que permitiu a modernização das infraestruturas, não só no continente como no Ultramar.

Começou a desenvolver-se um forte movimento de modernização tecnológica, quer em Lisboa, no Centro de Estudos de Engenharia Civil (CEEC), criado em 1942 no Instituto Superior Técnico (IST) e liderado por Manuel Rocha (1913-1981), quer nos dois laboratórios do Ultramar. Na área da investigação em engenharia civil e em particular na geotecnia, deu-se um passo decisivo com a constituição do Laboratório de Engenharia Civil (LEC), em 1946. Da colaboração frutuosa entre a Direção Geral dos Serviços Hidráulicos (DGSH) e o CEEC, surgiu o programa de estudos experimentais e analíticos para o dimensionamento de barragens arco, merecendo uma referência especial os pioneiros ensaios em modelo da barragem de Santa Luzia, com o objetivo de adquirir a técnica para a construção e ensaio de modelos daquele tipo de barragens.

Na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, o curso de engenharia civil, que se destacava pelo seu alto nível e informação atualizada, já incluía uma disciplina sobre o estudo dos maciços terrosos, como referido por Correia de Araújo no livro publicado em 1942. Este livro intitulado “Estudo dos maciços terrosos e dos seus suportes. Muros de suporte, fundações, silos” foi o primeiro livro relacionado com a Mecânica dos Solos a ser publicado em Portugal.

As preocupações com as fundações das estruturas, que exigiam um conhecimento geológico mais aprofundado dos terrenos e à caracterização do seu comportamento sob as ações a que eram submetidos, conduziu a que a atividade dos geólogos deixasse de ser de carácter essencialmente naturalista, para se transformar em aplicação da geologia à engenharia.

O grande desenvolvimento dos equipamentos de escavação, transporte, espalhamento e compactação dos solos e enrocamentos usados na construção das barragens de aterro e em estradas, conduziu a uma maior diversidade de equipamentos e ao aumento da capacidade de transporte. Nesses progressos tiveram um papel decisivo os scrapers, na escavação e transporte, e os cilindros vibradores, na compactação.

As obras com intervenção mais relevante da geotecnia na década de 1940 foram a barragem de Santa Luzia (1942), a autoestrada Lisboa-Estádio Nacional (1944), o Plano Integrado de Obras do Rio Liz (1948), a barragem de Pego do Altar e o respetivo túnel do Descarregador de Cheias (1949).

A barragem de Santa Luzia, do tipo abóbada, com 76 m de altura máxima e 115 m de desenvolvimento no coroamento, foi implantada numa garganta das cabeceiras do rio Unhais, na Serra da Estrela, inserida numa faixa quartzítica (Figura 3). A barragem foi construída segundo projeto do engenheiro André Coyne (1891-1960), que então iniciou a sua fecunda colaboração no país. Esta barragem foi a verdadeira precursora das grandes barragens que se seguiriam no pós-guerra.



Fig. 3 - Vista de montante da garganta quartzítica onde foi implantada a barragem de Santa Luzia (Xerez, 1939), vista aérea e planta da mesma barragem (Rocha e Laginha, 1950).

A Autoestrada Lisboa-Estádio Nacional foi a primeira autoestrada construída no país e uma das primeiras a nível mundial, com o maior trecho com pavimento rígido até essa data. Integra o viaduto Duarte Pacheco sobre o vale de Alcântara, primeira obra de vulto em betão armado, que se assumiu como capacidade realizadora do Estado Novo.

No âmbito das obras fluviais, merecem referência as obras do rio Liz, especialmente pelo forte incremento técnico-científico que lhe esteve associado. Com estas obras foi possível transformar zonas pantanosas em campos agrícolas de grande fertilidade, mantendo o rio em leito próprio.

A barragem de Pego do Altar, com 63 m de altura máxima, foi a primeira barragem de aterro de enrocamento construída em Portugal e, na sua época, foi a mais alta do mundo do seu tipo, apenas ultrapassada na década de setenta (Figura 4). É considerada a nível mundial um marco de inovação quanto à sua conceção estrutural. Tem uma cortina metálica de impermeabilização na face de montante apoiada sobre uma camada pouco espessa de betão simples assente sobre alvenaria hidráulica. Tem muro corta-águas com galeria visitável, a partir da qual foram efetuadas as injeções de impermeabilização do terreno de fundação. O tempo de execução desta barragem prolongou-se por 15 anos, principalmente devido às dificuldades criadas pela guerra.

Os principais agentes de mudança da década de 1940 foram:

- a criação do CEEC e a colaboração com a DGSH;
- a promulgação da lei de Eletrificação Nacional;
- a constituição das Empresas Hidroelétricas do Cávado e do Zêzere;
- a constituição do LEC;
- as verbas disponibilizadas pelo Plano Marshal;
- o grande desenvolvimento dos equipamentos de terraplenagem.

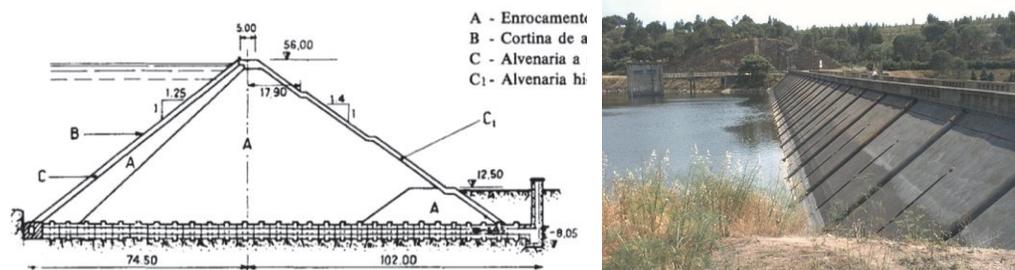


Fig. 4 - Perfil transversal e vista do paramento de montante da barragem de Pego do Altar (Maranha das Neves, 1987).

3.3 – Década de 1950. Os caminhos da modernização. Início do período de maioridade da engenharia

Nesta década continuou a execução do programa de obras públicas, nomeadamente de grandes aproveitamentos hidráulicos, quer para a produção de eletricidade, quer para rega e abastecimento de água. A elaboração e a execução dos planos destes aproveitamentos foram estendidas às províncias ultramarinas.

A execução do programa de eletrificação foi um sucesso, manifestando resultados significativos num intervalo de tempo consideravelmente curto. Tiveram um papel determinante as empresas hidroelétricas já existentes e, na década, a Hidroelétrica do rio Douro.

A engenharia portuguesa de barragens de betão entrou num período de maioridade que lhe permitiu projetar e construir grandes barragens de betão, as quais tiveram um desenvolvimento assinalável. Foram concluídas 16 barragens de betão, representando o maior número de barragens de betão construídas numa década em Portugal.

Prosseguiram as obras de rega do aproveitamento do rio Sado e estenderam-se a outros aproveitamentos das bacias dos rios Tejo, Guadiana e Mira, integradas num ambicioso Plano de Rega do Alentejo, elaborado pela DGSH e lançado em 1957.

Nesta década e nas seguintes, alguns conceituados geólogos distinguiram-se no domínio da Geologia Aplicada, quer no ensino, quer na consultoria associada a projetos de barragens e a fundações de edifícios e pontes.

Em 1951 foi constituída a Sociedade Portuguesa de Mecânica dos Solos (SPMS) que desenvolveu a sua atividade no âmbito da Comissão de Mecânica dos Solos da Seção de Engenharia Civil da Ordem dos Engenheiros (OE), liderada por Arantes e Oliveira e por Manuel Rocha e de que faziam parte, entre outros, Campos e Matos, Vasco Costa, Correia de Araújo, Henrique Leitão, José Folque, Pimentel dos Santos, Arsénio Nunes e Úlpio do Nascimento. Em dezembro de 1952 foi organizado por esta comissão, sob a orientação de Manuel Rocha, o Curso de Mecânica dos Solos, o qual viria a ser publicado em 1955. Este curso estabeleceu definitivamente a Mecânica dos Solos em Portugal.

O principal motivador do desenvolvimento da mecânica das rochas no país foi a intervenção nos projetos e na construção de novas barragens de betão. Manuel Rocha foi o impulsionador dos estudos da mecânica das rochas e um dos maiores investigadores a nível internacional neste domínio.

Dando continuidade ao gabinete de estudos de Alberto Manzanares Abecassis (1915- 2004), foi fundada, em 1957, a Hidrotécnica Portuguesa (já desaparecida), primeira grande empresa privada de consultoria de engenharia, que se dedicou inicialmente ao estudo e projeto de obras hidráulicas.

As obras com intervenção mais relevante da geotecnia na década de 1950 foram: a ponte Marechal Carmona (1951), as barragens de Pracana (1950) e de Castelo do Bode (1951), o Aproveitamento Hidroelétrico de Salamonde (1953), as barragens de Campilhas (1954), Cabril (1954), Maranhão (1957), Paradela (1958) e Picote (1958), o túnel do Caniçal, na Madeira, (1955) e o Primeiro Escalão do Metropolitano de Lisboa (1958).

Das pontes executadas nesta década destaca-se a ponte Marechal Carmona sobre o rio Tejo, em Vila Franca de Xira (Figura 5). As fundações foram materializadas por cravação de estacas pré-fabricadas de betão armado com 25 m de comprimento, deixadas cerca de 2 m fora de uma plataforma de areia previamente criada. Sobre o conjunto das estacas foi descido um caixão pré-fabricado em betão armado e pousado em cima das estacas. A parte de baixo do caixão formou uma câmara de trabalho que foi esvaziada de água por ar comprimido e preenchida com betão. A zona superior do caixão, em forma troncocónica, foi também cheia com betão.

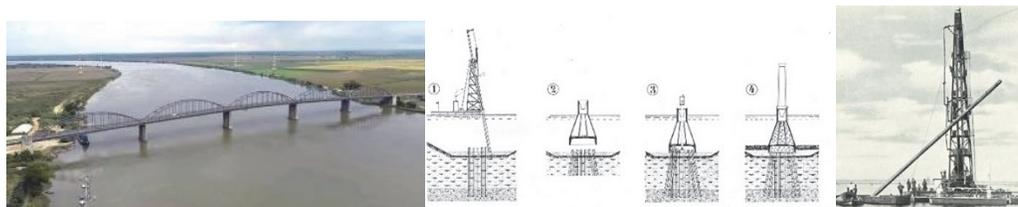


Fig. 5 - Vista de jusante da Ponte Marechal Carmona e metodologia construtiva das fundações.

Nas barragens de betão é de mencionar a de Cabril (Figura 6), que é, ainda hoje, a barragem mais alta de Portugal, com 132 m de altura máxima (108 MW). É reconhecida como tendo marcado o desenvolvimento das barragens do tipo arco de dupla curvatura do seu tempo. A fundação é formada por um maciço granítico porfiríode de boa qualidade. Trata-se de uma das maiores realizações da técnica nacional e que ficou a marcar a época como particularmente notável do nível técnico da engenharia portuguesa.

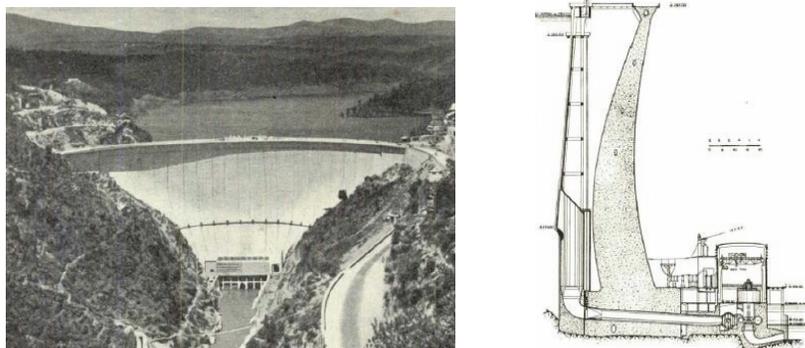


Fig. 6 - Vista de jusante e corte transversal da barragem de Cabril (Xerez, 1954).

É de referir, também, a barragem da Paradela (Figura 7), que foi, à data, a mais alta do mundo do seu tipo, com 112 m de altura máxima. Foi a primeira barragem de enrocamento lançado no país e é, ainda hoje, a barragem de aterro mais alta. Tem uma cortina de betão armado no paramento de

montante, constituída por lajes de betão armado com juntas horizontais e verticais. A barragem veio a sofrer deformações excessivas e danos diversos nas lajes, com esmagamento das juntas por compressão, e teve que ser reabilitada.

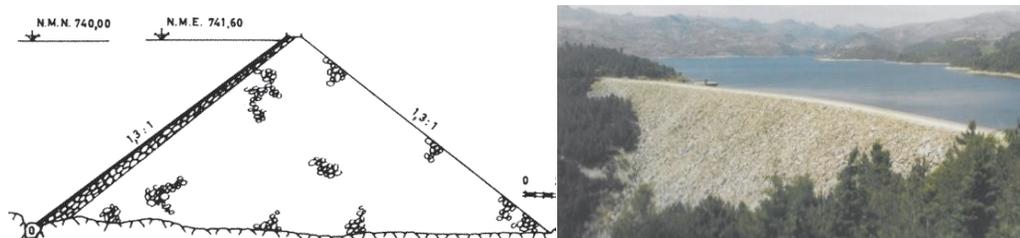


Fig. 7 - Perfil transversal e vista do paramento de jusante da barragem da Paradela.

Na cidade de Lisboa o sistema de transportes públicos foi reforçado com o lançamento do Metropolitano de Lisboa (ML), com duas linhas com uma extensão de 6,5 km e operando com 11 estações. As duas linhas, uma entre Sete Rios e a Rotunda e outra desde Entre Campos até à Rotunda, confluem num trecho comum, da Rotunda aos Restauradores. As linhas e as estações foram executadas ao longo de avenidas existentes por escavação a céu aberto, à exceção do trecho Rotunda-São Sebastião, executado em túnel.

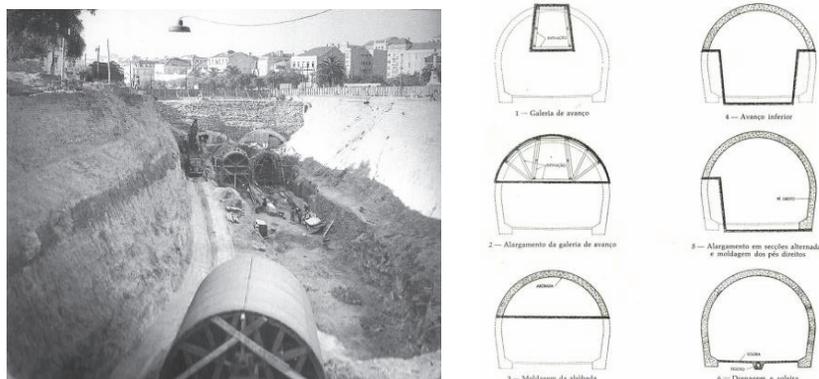


Fig. 8 - Execução, a céu aberto, na zona da rotunda do Marquês de Pombal e fases de construção do túnel no trecho Rotunda-São Sebastião do ML (Revista Técnica 265, outubro de 1956).

Os principais agentes de mudança na década de 50 foram:

- a constituição da SPMS (1951);
- a organização do Curso de Mecânica dos Solos na Ordem dos Engenheiros (1952);
- a criação dos primeiros cursos pós-laborais de Mecânica dos Solos na FEUP (1952);
- a criação da Hidroelétrica do Douro (1953);
- o aumento notável da construção de barragens para a produção de energia elétrica;
- o desenvolvimento de um ambicioso Plano de Rega do Alentejo;
- a criação de uma cadeira semestral de Mecânica dos Solos no IST e na FEUP (1955);
- a criação do primeiro grande gabinete de consultores (1957).

3.4 – Década de 1960. Surgimento de grandes empresas de projeto e de consultoria

Na década de 60 ocorreu a modernização tecnológica com a introdução da informática. O primeiro computador de primeira geração, instalado em 1959, com programação interna do LNEC,

permitia já a execução de cálculos de alguma importância, como foi o caso da realização de cálculos para a ponte sobre o rio Tejo, em Lisboa. Verificou-se uma endogeneização da tecnologia, que levou a que o setor nacional da engenharia desenvolvesse capacidades para projetar todos os tipos de grandes obras construídas por portugueses, no país ou no estrangeiro.

Iniciou-se a expansão da atividade de consultoria e projetos, verificando-se a criação, por engenheiros portugueses, de empresas de projeto e consultoria como a Coba (1962), a Profabril (1963), a Hidroprojecto (1966) e a Consulmar (1970).

Esta década foi o culminar de um período notável de execução de grandes obras de engenharia, envolvendo a construção dos primeiros lanços de autoestrada nas regiões de Lisboa e do Porto, vitais para o desenvolvimento do país, e de diversas barragens em todo o território nacional, promovendo o desenvolvimento de técnicas construtivas e o crescimento do número de engenheiros especializados, os quais deram o seu contributo à construção destas obras em Portugal e, mais tarde, no estrangeiro.

Em 1961 iniciou-se a guerra da independência de Angola, alargando-se poucos anos depois a outras províncias ultramarinas. Durante a segunda metade dos anos sessenta e do início da década seguinte foi dada prioridade à guerra colonial, o que consumiu recursos importantes, tendo surgido dificuldades financeiras, agravando-se o panorama socioeconómico e político do país.

A CPMS tornou-se independente da Ordem dos Engenheiros em 1960 e passou a assumir a designação de Agrupamento Português de Mecânica dos Solos (APMS), vindo a filiar-se na ISSMFE. Em 1966, coincidindo com a realização em Lisboa do primeiro Congresso Internacional de Mecânica das Rochas, o Agrupamento alarga o seu âmbito à Mecânica das Rochas e passa a designar-se Agrupamento Português de Mecânica dos Solos e das Rochas (APMSR), integrando-se na ISRM (SPG, 2021). Com isto, também em Portugal a mecânica das rochas se consagrou como uma disciplina independente, no âmbito da engenharia geotécnica. Naquele congresso, Manuel Rocha foi eleito presidente no período de 1966-1970 e o secretariado daquela associação ficou instalado no LNEC, onde ainda hoje permanece.

Em 1968 foi publicado o Regulamento de Pequenas Barragens de Terra. Foi a primeira peça legislativa relativa à segurança de barragens portuguesas. Foi substituído em 1993 pelo Regulamento de Pequenas Barragens (Maranha das Neves, 2011).

No final da década, iniciou-se a aplicação de duas novas tecnologias com grandes potencialidades que revolucionaram a forma como passaram a ser concebidas as obras mais complexas: as paredes de betão armado moldadas no terreno e as ancoragens pré-esforçadas em solos. A combinação destes dois importantes avanços tecnológicos contribuiu para a generalização das grandes escavações urbanas nas décadas seguintes, em consequência não só da redução do custo, como dos prazos de execução, para além da redução do risco dos danos introduzidos nas estruturas vizinhas do recinto de escavação (Matos Fernandes et al, 2021).

As obras com intervenção mais relevante da geotecnia na década de 60 foram: os primeiros lanços da Autoestrada do Norte, entre Lisboa e Vila Franca de Xira (1961) e entre Carvalhos e Santo Ovídio, com a Ponte da Arrábida sobre o rio Douro, no Porto (1963), e da Autoestrada do Sul de Almada até ao Fogueteiro, com a Ponte 25 de Abril (1966), as barragens do Alto Rabagão (1965), de Santa Clara (1968) e de Miranda do Douro (1961) e Bemposta (1964), no trecho internacional do rio Douro, e o Estaleiro Naval da Lisnave na Margueira (1967).

O lanço da Autoestrada do Norte entre Lisboa e Vila Franca de Xira suscitou inúmeros problemas de ordem geotécnica e constituiu um caso exemplar de colaboração JAE-LNEC. O acesso norte à Ponte 25 de Abril também foi complexo do ponto de vista geotécnico, tendo sido necessário realizar obras de estabilização.

Das inovações da ponte 25 de Abril é de destacar o método de execução das fundações das torres dos pilares no rio, designado por método dos caixões abertos com domos de ar, tendo sido atingida uma profundidade de 79 m na fundação da torre sul. Estas fundações são grandes blocos de betão com dimensões em planta de 40 m x 23 m. Para a sua construção foi utilizado o processo que consistiu na execução de grandes moldes metálicos, concebidos por forma a que as suas seções

fossem flutuantes. Estas seções iniciais com um peso de 700 ton (Figura 9), foram construídas em terra, lançadas à água e rebocadas para os locais dos pilares. Seguiu-se uma forte amarração a âncoras muito pesadas previamente colocadas no fundo do rio. Os moldes iniciais foram então acrescentados na parte superior com seções metálicas com altura de 6 m cada. Colocada uma seção, procedeu-se ao enchimento do molde flutuante com betão, por forma a conseguir-se uma descida gradual correspondente à seção acrescentada na parte superior, seguindo-se afundamentos sucessivos com novas seções metálicas e betonagens até que a parte inferior do caixão metálico atingisse os lodos do fundo do rio. Os caixões metálicos assim construídos tinham uma seção celular por forma a deixar 28 vazios cilíndricos de 4,20 m de diâmetro, através dos quais foi feita a escavação dos lodos e areias, por forma a permitir a descida dos caixões de fundação e o encastramento nos basaltos lávicos. Para assegurar a flutuação a partir de determinada profundidade submersa dos caixões, foram colocadas cúpulas nos topos dos poços vazios e foi introduzido no interior ar sob pressão. Sobre esta infraestrutura, após o enchimento dos poços com betão, foi realizado o maciço de fundação em betão armado com 7 m de altura, onde foram fixadas as torres metálicas (Rodrigues, 2016).

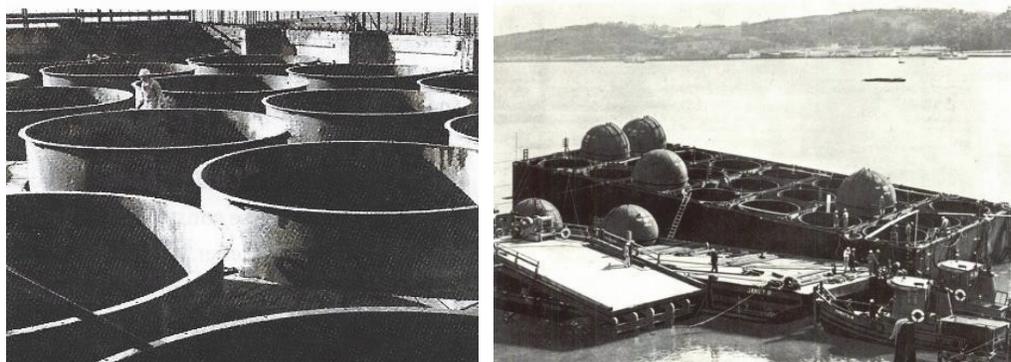


Fig. 9 - Seção flutuante de aço, fabricada em Vila Franca de Xira, destinada à construção das fundações da torre norte da ponte 25 de abril sobre o rio Tejo (capa da Revista Técnica 325, fevereiro 1963).

A barragem de Santa Clara, no rio Mira, merece referência especial, não só pela sua altura máxima de 86 m, como pelos aspetos inovadores então considerados no seu projeto (Figura 10). Foi projetada pela DGSH, com forte apoio do LNEC. Mantem-se, à data, a maior barragem de terra portuguesa, zonada sem filtro vertical. O terreno de fundação é um maciço rochoso de xistos e grauvaques com diferentes graus de alteração e o aterro da barragem é constituído por xistos. A construção da barragem traduziu-se num forte impacto em todos os sectores da região, designadamente no que se refere à agricultura e à agroindústria.

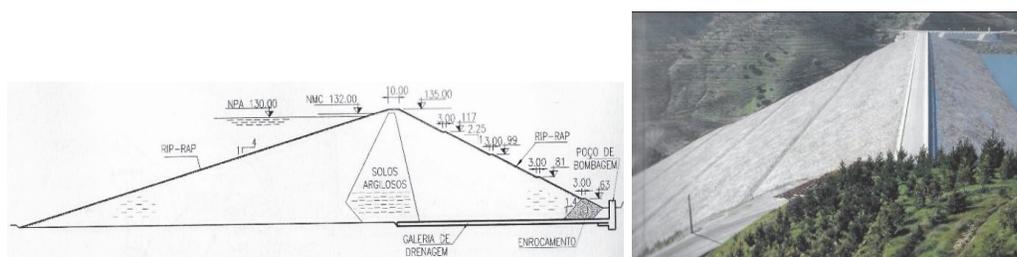


Fig. 10 - Perfil Transversal e vista da barragem de Santa Clara.

A primeira fase do Estaleiro Naval da Lisnave na Margueira (Almada) conquista rapidamente posição na área da construção e da reparação naval, atividade até então circunscrita a estaleiros de pequena dimensão. As principais infraestruturas nessa fase eram constituídas por duas docas secas convencionais, as docas 11 e 12, um cais e três pontes cais com os respetivos duques de alba. As condições geotécnicas locais são muito favoráveis, pois, ao nível da fundação das paredes e das lajes de fundo das docas, ocorrem areias argilosas do Miocénico, muito densas, cujo coeficiente de permeabilidade médio, de cerca de 10^{-7} m/s, possibilitou a adoção de soluções estruturais muito económicas, com lajes de fundo drenadas apoiadas diretamente no terreno. O êxito comercial do empreendimento excedeu as expectativas, de tal forma que foi alargada a capacidade de docagem a fim de receber petroleiros da nova geração então prevista, com navios até 1 000 000 tdw. Com a ampliação com a doca 13 (Figura 11), a maior doca seca do mundo na época, construída entre 1969 e 1971, o Estaleiro Naval da Lisnave passou a ser considerado um dos melhores estaleiros de reparação naval da Europa e uma referência internacional no setor.

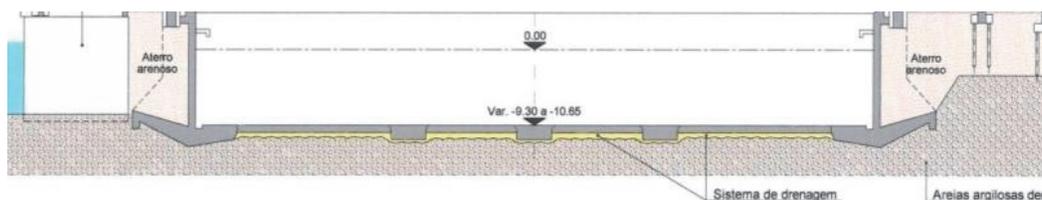


Fig. 11 - Corte-tipo da doca 13 da Lisnave (520 m x 97 m).

Os principais agentes de mudança na década de 1960 foram:

- a industrialização de setores básicos da economia portuguesa;
- a alteração da designação de CPMS para APMS e sua filiação na ISSMFE (1960);
- a criação do Departamento de Geotecnia do LNEC e do Grau de Especialista (1961);
- a realização do Primeiro Congresso da ISRM, no LNEC (1966);
- a alteração da designação do APMS para APMSR e sua filiação na ISRM (1966);
- a publicação do Regulamento de Pequenas Barragens de Terra (1968);
- o estabelecimento da Geologia da Engenharia como ciência autónoma, em substituição da Geologia Aplicada à Engenharia (meados dos anos 60);
- o surgimento de grandes empresas de projeto e de consultoria;
- o desenvolvimento das tecnologias das paredes moldadas e das ancoragens;
- a aceitação universal do conceito de Geotecnia.

3.5 – Década de 1970. Democracia e viragem para a Europa

Na sequência da revolução do 25 de abril de 1974 ocorreram mudanças de vulto no tecido empresarial português, designadamente no setor da construção, tendo algumas empresas de consultoria e de construção entrado em declínio irreversível e outras entrado em fase de reestruturação. Em 1975 deu-se a independência dos territórios africanos sob administração portuguesa (Angola, Moçambique, Guiné Bissau, Cabo Verde e S. Tomé e Príncipe), o que fez regressar a Portugal grande parte dos técnicos que aí trabalhavam.

O desenvolvimento dos computadores e o advento do método dos elementos finitos, que o próprio LNEC implantou em Portugal, veio a tornar possível a resolução das equações dos modelos matemáticos da engenharia.

Em 1975 foi nacionalizado o setor elétrico, tendo sido integradas na EDP todas as empresas que realizaram aproveitamentos hidroelétricos iniciados nos primórdios do século XX.

Em Portugal começou a verificar-se a tendência, ocorrida na década anterior nos países mais desenvolvidos, devido ao grande crescimento económico, de multiplicação das grandes escavações

urbanas, não apenas para linhas do Metro ou outras obras viárias, mas também para estacionamento automóvel em caves de novos edifícios ou sob espaços públicos (Matos Fernandes, 2010). Os processos de tratamento de terrenos tiveram um desenvolvimento significativo na década de 70, passaram a ser utilizados no país os aterros de pré-carga, os geodrenos, a vibrocompactação, a vibrosubstituição (colunas de brita) e a compactação dinâmica.

O lançamento do primeiro número da revista *Geotecnia*, dirigida por José Folque, ocorreu em junho de 1971, sob a presidência do APMSR de Úlpio Nascimento. O APMSR adquiriu a sua atual designação, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, a partir de 1972. A finalidade da SPG, atuando como uma sociedade sem fins lucrativos, foi o de estabelecer a ligação dos profissionais que trabalham no campo da engenharia geotécnica, para promover e implementar a investigação e contribuir para a educação.

No ano letivo de 1975/76 foram lançados, sob a coordenação de Ricardo de Oliveira, os primeiros Cursos de Especialização na área da geotecnia, um em Geologia da Engenharia e outro em Mecânica dos Solos, na Universidade Nova de Lisboa (Oliveira, 2010).

Quando Manuel Rocha foi eleito Bastonário da Ordem dos Engenheiros, em 1978, reativou a atividade cultural da OE, tendo-se constituído o Grupo de Trabalho de Geotecnia, no âmbito da Comissão Cultural de Engenharia Civil, coordenado por Úlpio de Nascimento, com o objetivo de desenvolver ações de índole mais profissional, para as quais a OE estaria mais vocacionada.

As obras com intervenção mais relevante da geotecnia na década de 70 foram a consolidação da Encosta das Portas do Sol, em Santarém, (1970), a contenção provisória da estação Alameda do ML (1972), as barragens de Carrapatelo (1971), da Régua (1973) e da Valeira (1976), no Douro Nacional, a barragem de Cahora Bassa, em Moçambique (1974), os Estaleiros Navais da Setenave, na Mitrena (1975), o Molhe Oeste do Porto de Sines (1977) e a estação Saldanha do ML (1977).

A intervenção mais importante de consolidação da Encosta das Portas do Sol, em Santarém, foi concluída em 1970. As muralhas assentam numa camada calcária e calco-margosa, sobrejacente a terrenos brandos de natureza arenosa e silto-argilosa. As causas dos escorregamentos resultaram da erosão e meteorização dos terrenos e da acumulação de águas subterrâneas em camadas aquíferas suspensas na zona superior da encosta. Na base da encosta situa-se a Linha Férrea do Norte. As obras realizadas, ainda hoje em bom e pleno funcionamento, consistiram principalmente na execução de ancoragens em muros de suporte em socalcos estrategicamente situados, protegendo simultaneamente as Muralhas das Portas do Sol no topo e a via férrea na base. A conceção original e o projeto das obras foram da responsabilidade de Pedro Teixeira Duarte (1918-2023), tendo estas sido executadas pela empresa Teixeira Duarte. Foram regularizados 20 000 m de taludes,

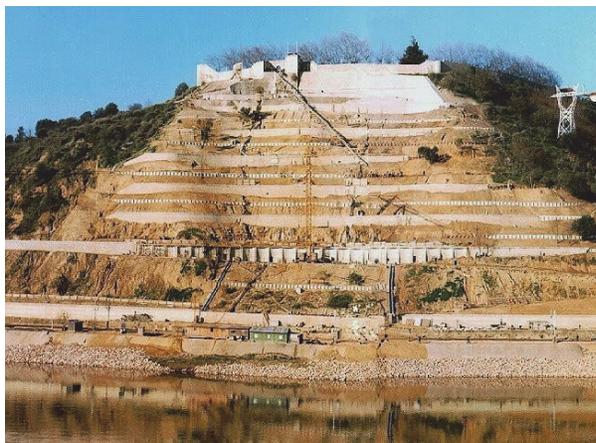


Fig. 12 - Vista das obras de estabilização da encosta das Portas do Sol (arquivo Teixeira Duarte).

construídos 3000 m² de muros de suporte de diversos tipos, desde aligeirados a mais pesados, 12000 m de ancoragens definitivas e 2000 m de drenos sub-horizontais (Figura 12). Esta é uma obra emblemática pelas soluções inovadoras implementadas para o controlo das causas dos escorregamentos.

A estação da Alameda do ML foi executada a céu aberto com uma grande escavação conseguida através da execução de amplas e altas cortinas de estacas verticais tangentes, de betão armado, com 4 níveis de ancoragens (Figura 13). Foi uma das obras pioneiras no país com esta solução de contenção.

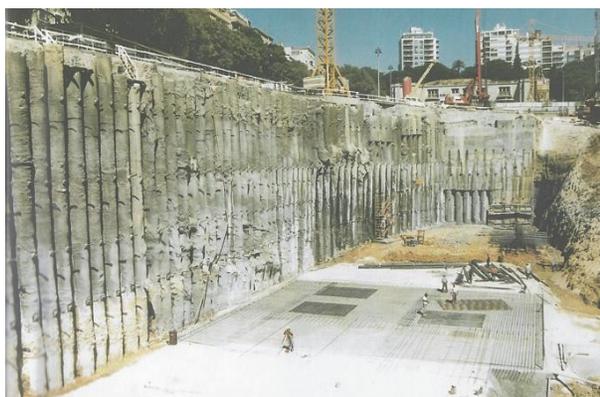


Fig. 13 - Vista da Estação Alameda do ML, após a conclusão da escavação.

Das barragens do Douro nacional, o escalão do Carrapateiro é o que dispõe de maior queda, de 34,5 m, e potência de 201 MW. O perfil da barragem gravidade é aligeirado mediante uma grande galeria circular junto à fundação deixando aparente a rocha na soleira. Esta galeria reduz as subpressões, facilita a drenagem e proporciona o bom funcionamento estrutural, permitindo uma inspeção direta e permanente das fundações (Figura 14). A fundação da barragem é constituída por um maciço granítico, muito fraturado, com intercalações de argila, atravessado por uma grande falha, a qual, na zona da central, condicionou severamente a construção desta estrutura.

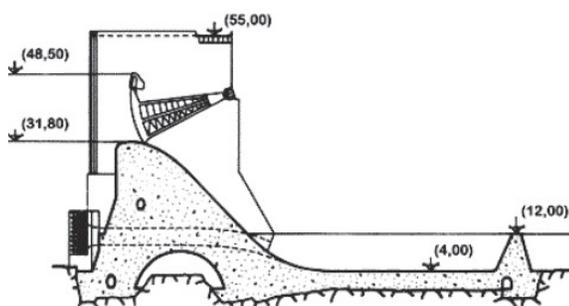


Fig. 14 - Seção transversal e vista aérea da barragem do Carrapateiro.

Cahora Bassa é um mega aproveitamento hidroelétrico, no rio Zambeze, em Moçambique, que criou o segundo maior lago artificial da África Meridional, com a capacidade útil de 52 000 Mm³, que é mais de dezasseis vezes a capacidade útil da albufeira de Alqueva, o maior lago artificial da Europa. A área da correspondente bacia hidrográfica é de 900 000 km², sensivelmente dez vezes a área de Portugal continental. A barragem abóbada de betão tem a altura de 164 m, órgãos de descarga dimensionados para o caudal de 12 600 m³/s e uma central subterrânea na margem sul do rio

Zambeze com cinco grupos de 400 MW (Figura 15). A rocha do local é constituída por um gnaisse granitóide de excelentes qualidades mecânicas, que, não obstante a existência de alguns filões lamprofíricos e gábricos, que puseram alguns problemas de projeto e de execução, permitiu a escavação de cavernas e galerias de grandes dimensões para a central sul, o circuito hidráulico e as galerias de desvio provisório. A barragem de Cahora Bassa representou um testemunho da capacidade da engenharia portuguesa para a conceção e o projeto da instalação de unidades hidroelétricas de grande potência.

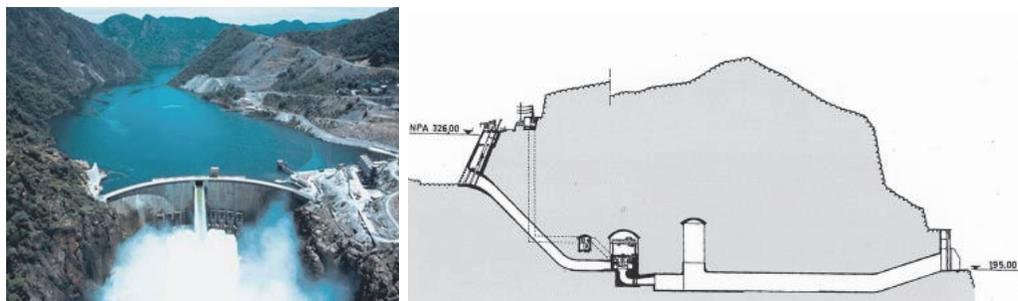


Fig. 15 - Vista de jusante da barragem de Cahora Bassa em descarga máxima de cheias e corte longitudinal da central e do circuito hidráulico (Cruz et al, 2007).

O Porto de Sines é o maior porto artificial de Portugal e das mais relevantes obras da engenharia portuguesas. Este projeto portuário assentou, inicialmente, na construção do molhe oeste a partir do cabo de Sines, com cerca de 2 000 m de extensão e fundo máximo de -50 m ZH (Figura 16). Para a sua construção foram usados 6 Mm³ de enrocamentos, constituídos por blocos de 3 a 20 ton. A seleção de uma pedreira para exploração de tal volume de enrocamentos com características adequadas constituiu um desafio da Geologia de Engenharia. Com a entrada em serviço do terminal petrolífero, foi concluída a primeira fase do porto de águas oceânicas de Sines, o maior porto artificial de Portugal e um porto oceânico de águas profundas, de fundos naturais até -28 m ZH, capaz de permitir a acostagem de navios de grande porte.



Fig. 16 - Vista aérea e perfil do molhe principal do Porto de Sines.

A aplicação das novas tecnologias das paredes moldadas e das ancoragens revolucionaram a forma como passaram a ser concebidas as obras mais complexas, permitindo que passassem a ser utilizadas diversas técnicas, como as paredes tipo Berlim, com pranchas de madeira, ancoradas, paredes moldadas, ancoradas ou escoradas, paredes moldadas suportadas pelas lajes da estrutura e paredes tipo Berlim definitivas escoradas ou ancoradas. Um exemplo é o da Estação Saldanha do ML que foi executada ao abrigo de uma cortina tipo Berlim ancorada (Figura 17).

Os principais agentes de mudança na geotecnia na década de 1970 foram:

- o desenvolvimento dos computadores e o advento do método dos elementos finitos;
- o lançamento da revista Geotecnia;
- a constituição da SPG;



Fig. 17 - Cortina tipo Berlim ancorada na Estação Saldanha do Metropolitano de Lisboa (arquivo Teixeira Duarte).

- a filiação do APMSR na IAEG (1972);
- a criação dos Cursos de Pós-graduação em Geotecnia na UNL;
- a tendência evolutiva para a construção das barragens de aterro com perfis zonados com filtro chaminé;
- o aumento significativo da utilização dos processos de tratamento de solos.

3.6 – Década de 1980. Surgimento dos fundos comunitários

Com os primeiros anos da década de 80, o ciclo económico voltou a inverter-se e o mercado da construção ressentiu-se totalmente. A deterioração da procura e o agravamento da situação económico-financeira, criaram uma situação sem paralelo desde a recessão de 1974-75. Face a este quadro de recessão, que se iniciou em 1981 e atingiu o pico em 1985, as empresas de construção procuraram no mercado internacional as encomendas que não era possível obter no país. O primeiro passo fez-se na direção dos países africanos de expressão portuguesa. A internacionalização foi, no entanto, um processo demorado e, só por si, não significou o surgir de um novo ciclo.

Em 1985 deu-se a adesão de Portugal à Comunidade Económica Europeia (CEE), a qual viria a ter um papel fundamental e decisivo para o desenvolvimento económico do país, com repercussões evidentes no desenvolvimento da geotecnia.

Mais para o final da década, começou a verificar-se a dinamização da execução de obras de construção civil, designadamente nas áreas rodoviária, aeroportuária, fluvial e marítima, que teve como consequência a importação de tecnologias já largamente aplicadas noutros países, mas que conduziu à modernização das empresas de construção e ao desenvolvimento de meios tecnológicos e à formação de técnicos especializados. Instalaram-se em Portugal grandes empresas internacionais de engenharia, o que obrigou as empresas nacionais a desenvolver a sua atividade num ambiente de mercado totalmente aberto, caracterizado por uma concorrência muito forte, onde a sua capacidade, mesmo no mercado nacional, passou a ser cotejada com a das referidas empresas internacionais.

Em 1980 foi publicada a legislação que criou os Mestrados em Portugal, tendo sido possível transformar os Cursos de Especialização em Mestrados, com a mesma designação e o mesmo currículo letivo, sendo necessária a elaboração de uma dissertação e a sua discussão pública. É de assinalar que a primeira tese de mestrado defendida em Portugal na área das ciências foi na UNL e em Mecânica dos Solos. Com o surgimento dos fundos comunitários e da lei da Autonomia das Universidades, estas começaram a desenvolver a área da investigação, com meios e com a flexibilidade que a nova lei lhes proporcionou. A investigação desenvolvida pelas Universidades teve um pendore mais teórico enquanto que a investigação no LNEC tendeu mais para a aplicação.

A década de 80 foi caracterizada pelo aparecimento de grandes preocupações ambientais em Portugal, iniciando-se um período de vultuosos investimentos no setor, em parte provenientes da

CEE, o que viria a transformar profundamente o panorama nacional neste domínio. Verificou-se, também, uma crescente preocupação com os problemas da segurança e qualidade das barragens. Desenvolveu-se, assim, no país um efetivo sistema de segurança de barragens, tendo a experiência na engenharia de barragens portuguesa sido sintetizada, a partir da década de 1980, num importante conjunto de diplomas legais, constituído pelo Regulamento de Segurança de Barragens e respetivas normas complementares de projeto, de construção, de exploração e de observação e inspeção.

As obras do âmbito hidroelétrico foram, a partir de meados da década de 80, condicionadas por vários fatores: estar concluída uma boa parte dos aproveitamentos com maior interesse económico, restrições do ponto de vista ambiental, expansão da componente hidroelétrica através do reforço de potência em aproveitamentos existentes, início da revisão da adequação, reabilitação e reforço das estruturas existentes e dos órgãos complementares de segurança e exploração e forte incremento da construção de aproveitamentos mini-hídricos (Silva Gomes et al, 2004).

Nesta década começou a aplicar-se na estabilização de taludes de escavação a técnica dos muros pregados, consistindo na execução, de cima para baixo, de faixas de pregagens e de betão projetado. O sistema de escoramento pré-esforçado teve as suas primeiras aplicações, quando foi necessário limitar as deformações associadas a escavações de grande largura em que não era possível utilizar ancoragens. A técnica das paredes moldadas no terreno desenvolveu-se ainda mais a partir da altura em que foi possível começar a fazer o desmonte do terreno por uma hidrofresa, equipamento suscetível de desmontar solos muito rijos e maciços rochosos, permitindo maior rigor na verticalidade dos painéis e obter juntas entre painéis praticamente impermeáveis.

Na década de 1980 a SPG desenvolveu significativa atividade, de que se destaca o 1.º Encontro Luso-Brasileiro de Geotecnia, realizado em Lisboa, em 1981, e o 1.º Congresso Nacional de Geotecnia, realizado em Lisboa, em 1985. Este foi designado de Encontro e só a partir do 4º, em 1991, passou a designar-se de Congresso. Teve como tema “A Geotecnia em Obras nas Áreas Urbanas”.

As obras com intervenção mais relevante da geotecnia na década de 80 foram as barragens de aterro de Morgavel (1980), da Meimoa (1985) e de Beliche (1986), o Aproveitamento de Fins Múltiplos do Mondego (1986), incluindo a barragem da Aguieira, a ponte-açude de Coimbra (1981) e a regularização do rio Mondego a jusante de Coimbra, o Terminal Cerealífero da Trafaria (1984), as barragens de betão de Crestuma-Lever (1985) e do Torrão (1988), as barragens de Pequenos Libombos, em Angola (1985) e da Corumana, em Moçambique (1989), o início da exploração das minas de cobre da Somincor (1988) e os túneis de Calvanas, da Cidade Universitária e do Alto dos Moinhos do ML.

A barragem de Beliche é constituída por maciços estabilizadores de enrocamento de granulometria extensa e por um núcleo argiloso com filtros chaminé a montante e a jusante com camadas duplas de filtro grosso e filtro fino (Figura 18). Foi a primeira barragem com este tipo de perfil a ser construída em Portugal. A fundação é constituída por formações xistosas e grauváquicas. Os materiais a usar na barragem foram ensaiados em equipamentos projetados e construídos no LNEC. Este conjunto de estudos contribuiu para colocar o país num lugar cimeiro no domínio da utilização de enrocamento em diversos tipos de infraestruturas (Maranha das Neves, 2008).

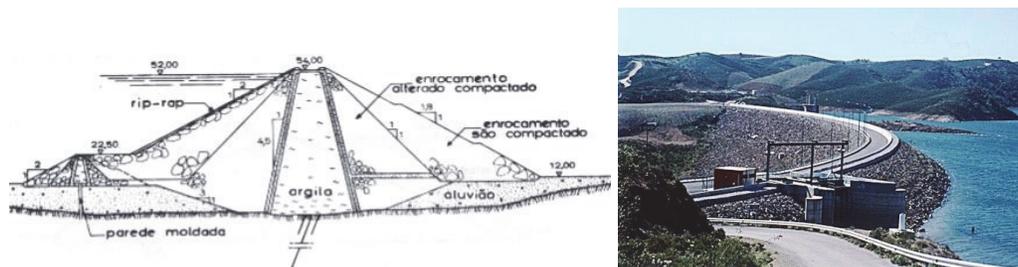


Fig. 18 - Corte transversal central e vista aérea da barragem de Beliche.

A barragem da Aguieira (270 MW), constituída por três abóbadas múltiplas de grandes vãos, constitui, sem dúvida, uma obra de referência na engenharia de barragens. Com 89 m de altura máxima e vãos de 90 m, é uma estrutura muito complexa apoiada em dois contrafortes e nos encontros (Figura 19). A melhoria das condições mecânicas e hidráulicas da fundação foi feita com recurso a tratamento com injeções de cimento e furos de drenagem, prática seguida desde a construção das primeiras barragens de betão nos anos 40. No caso da barragem da Aguieira o traçado em planta das galerias de injeção desenvolve-se ao longo de alinhamentos próximos da fundação das abóbadas, com dois ramais orientados segundo a direção dos contrafortes (Lima et al, 2021).

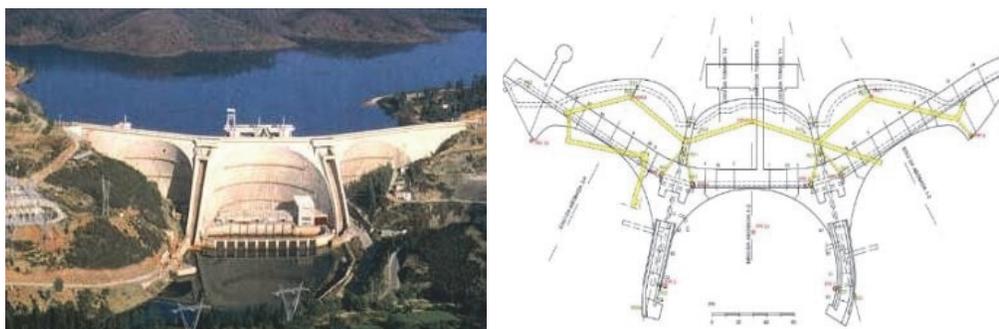


Fig. 19 - Vista aérea de jusante e planta da barragem da Aguieira com a localização das galerias de injeção (Lima et al, 2021).

O aproveitamento do Torrão (140 MW), no rio Tâmega, afluente do rio Douro da margem direita, tem perfil gravidade com vazamento, com curvatura circular em planta e altura máxima acima da fundação de 69 m, sendo a barragem do tipo gravidade mais alta do país.

As duas últimas décadas do século XX fecham um ciclo da engenharia de minas em Portugal, com o encerramento gradual da quase totalidade das minas metálicas e de carvão do país. Sobraram dois pilares: a mina de Neves-Corvo e a já centenária mina da Panasqueira.

O aproveitamento da Corumana, em Moçambique, destinou-se à regularização dos caudais do rio Sabié, à rega e à produção de energia (14,5 MW). Tem um volume de armazenamento de 1 380 hm³ (Figura 20). A barragem é de terra, com perfil zonado, com altura acima da fundação de 45 m, desenvolvimento do coroamento de 3 050 m e volume de aterro de 8,5 Mm³. O terreno de fundação é constituído por depósitos coluviais e aluviais sobre o manto basáltico. Dispõe de uma parede moldada com 0,80 m de espessura, 760 m de desenvolvimento, profundidade máxima de 28 m e área de 16 130 m². Foi constituída por uma argamassa plástica com deformabilidade semelhante à dos solos de fundação.



Fig. 20 - Vista aérea da barragem da Corumana.

Os principais agentes de mudança na geotecnia na década de 1980 foram:

- a adesão de Portugal à CEE;
- o início do desenvolvimento da área da investigação nas Universidades;
- a criação dos Mestrados em Mecânica dos Solos e em Geologia da Engenharia;
- o projeto de investigação sobre enrocamentos no LNEC;
- a publicação do Regulamento de Segurança de Barragens;
- o início da produção de cobre nas minas da Somincor;
- o aparecimento de grandes preocupações ambientais;
- o desenvolvimento da técnica dos muros pregados;
- desenvolvimento da escavação das paredes moldadas com hidrofresa.

3.7 – Década de 1990. Grande desenvolvimento das obras públicas

A década de 90 foi um período muito intenso de construção em Portugal, em grande parte resultante da disponibilização de fundos comunitários no âmbito de vários programas de apoio ao desenvolvimento decorrentes da integração de Portugal na União Europeia.

O desenvolvimento económico e social interno e a redução das assimetrias regionais dependiam em muito da estrutura rodoviária, tanto mais que 90% dos transportes de pessoas e mercadorias se fazia por estradas, pelo que foi privilegiada a melhoria das ligações entre o litoral e o interior, os acessos às grandes cidades e a integração da estrutura viária na rede transeuropeia. Assim, logo entre 1990 e 1995, foram construídos mais de 800 km de Itinerários Principais e cerca de 350 km de Itinerários Complementares. Foi também construída uma nova rede rodoviária na Ilha da Madeira que permitiu melhorar muito a rapidez de ligação do Funchal às maiores vilas da ilha. Este foi o mais importante investimento na história da Ilha.

No planeamento urbanístico há a destacar na zona norte de Lisboa o complexo da Expo'98, com execução de obras de grande relevo. É considerado um dos maiores projetos de infraestruturas a nível nacional e mesmo a nível europeu. Situadas na zona aluvial do rio Tejo, em que as aluviões lodosas atingem profundidades máximas da ordem de 20 m, estas obras constituíram uma notável realização da engenharia, com forte componente geotécnica, cuja realização representou um enorme desafio conceptual e técnico.

Ao grande desenvolvimento das obras públicas correspondeu um grande crescimento da atividade na área da geotecnia, com o alargamento dos serviços de geotecnia das grandes empresas e com o nascimento de novas empresas, algumas delas dedicadas exclusivamente ao projeto e à fiscalização de obras geotécnicas.

Em 1990 foi publicado o Regulamento de Segurança de Barragens, a que se seguiu a publicação das Normas Complementares. A publicação desta legislação veio definir um quadro legal dos mais abrangentes do mundo, o que colocou, nesta década, o país numa posição destacada a nível internacional.

Em 1994 decorreu em Lisboa o 7.º Congresso Internacional da IAEG, organizado pela SPG, culminando a presidência desta associação por Ricardo de Oliveira no período de 1990-1994. Em 1994, em resultado do crescimento dos problemas relacionados com o controlo e preservação do ambiente, foi realizado em Edmonton no Canadá o primeiro Congresso Internacional de Geotecnia Ambiental. O terceiro congresso viria a ser realizado em Lisboa em 1998.

Em 1997, a Sociedade Portuguesa de Geotecnia completou 25 anos, tendo realizado uma Sessão Comemorativa dedicada ao Eurocódigo 7 (SPG, 1997), com o objetivo de divulgar o EC7 e de apresentar casos práticos de adoção dos métodos de dimensionamento preconizados, baseados na verificação da segurança e da funcionalidade relativamente aos estados limites, o que viria a introduzir uma profunda modificação da prática geotécnica portuguesa.

No que respeita ao ensino superior, foi assinada por 29 países, em junho de 1999, a Declaração de Bolonha sobre a Educação Superior na Europa com o objetivo de tornar semelhante o sistema educativo, o que se viria a repercutir na organização dos cursos universitários.

As obras com intervenção mais relevante da geotecnia na década de 90 foram: o aproveitamento hidroelétrico do Lindoso (1992), a autoestrada A9 (CREL), com os túneis de Carenque e de Montemor (1995), o Centro Distribuidor de Santo Estevão (1996), as barragem do Funcho (1993) e de Odeleite (1997), a barragem de Al Whada, em Marrocos, as Linhas do ML da Baixa, com as estações da Baixa-Chiado e do Cais do Sodré (1998), e Vermelha, da Alameda à Expo'98 (1998) e a Segunda Travessia Rodoviária do Tejo em Lisboa, com a Ponte Vasco da Gama (1998).

Em 1992 foi concluído um importante aproveitamento hidroelétrico que substituiu o do Lindoso. Inclui as barragens do Alto Lindoso e do Touvedo, a primeira com 110 m de altura máxima. Este aproveitamento distingue-se pela sua grande central subterrânea, a mais de 300 m de profundidade, caracterizada por, na altura, ter a mais elevada potência instalada em Portugal (630 MW). A central tem as dimensões de 21 m x 42 m x 91 m, constituindo uma das maiores centrais subterrâneas na Europa. O circuito hidráulico é constituído por grandes túneis de derivação e de restituição e por cavernas para a central, chaminé de equilíbrio e câmaras de válvulas e poços de carga, de barrantos e de arejamento. Pela primeira vez na história dos projetos hidroelétricos subterrâneos em Portugal foi utilizada a técnica do raise-boring na abertura de poços (Plasencia, 2014).

A autoestrada A9 (Circular Regional Exterior de Lisboa), entre Caxias e Alverca, tem uma extensão de 34,4 km e engloba dois importantes túneis, o de Carenque, com 280 m de extensão, e o de Montemor, com 650 m de extensão, e um longo viaduto sobre a baixa aluvionar de Loures. Os túneis são constituídos por duas galerias com 19,44 m de largura cada. A construção do túnel de Carenque teve como objetivo a preservação de uma área de icnofósseis de elevado valor paleontológico com registos de pegadas de dinossauros do período Cretácico (Figura 21). Para a execução do emboquilhamento Este, fortemente condicionado pela existência das pegadas de dinossauros e de pequeno recobrimento, considerou-se a construção de túneis laterais de seção reduzida ou side-drifts, para além de um reforço estrutural do maciço com enfilagens. Nesta década há ainda a assinalar a construção de outros túneis rodoviários de grande seção nas autoestradas, para alojar duas vias de tráfego em cada sentido. Pode dizer-se que foi o arranque da moderna engenharia de túneis em Portugal.



Fig. 21 - Portal Este durante a fase de execução e portal Oeste após conclusão (Pistone e Melâneo, 1995).

O Centro Distribuidor de Santo Estevão está integrado no Sistema Hidráulico de Odeleite-Beliche e situa-se a 4 km a norte de Tavira. É constituído por um reservatório a céu aberto, de forma retangular, um dos maiores deste tipo na Península Ibérica (Figura 22). O reservatório foi integralmente impermeabilizado com uma geomembrana exposta do tipo PEAD (polietileno de alta densidade), com 2 mm de espessura nos taludes e 1,5 mm de espessura no fundo, com uma área total de 35 000 m².



Fig. 22 - Vista geral do reservatório de Santo Estevão (Mateus de Brito e Baião, 1997).

A construção da barragem de Al Whada, em Marrocos, teve como objetivos o controle de inundação, irrigação, abastecimento de água e produção de energia hidroelétrica. Esta barragem situa-se numa zona de elevado risco sísmico. É do tipo terra zonada, com 1 600 m de comprimento no coroamento e com uma altura máxima acima da fundação de 88 m (Figura 23). O volume de escavações é de 13,8 Mm³ e o de aterros é de 26,4 Mm³. O volume de armazenamento é de 3 800 Mm³. O terreno de fundação é constituído por margas intercaladas com arenitos, sendo o leito de rio preenchido com aluviões grossas e finas.

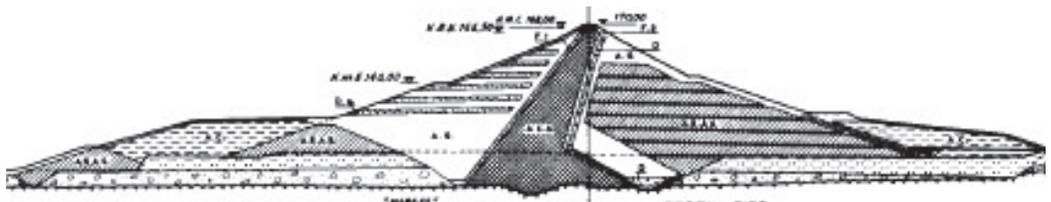


Fig. 23 - Perfil transversal da barragem de Al Whada, Marrocos (Mineiro, 1978).

A conceção da barragem, da configuração e do traçado do descarregador de cheias, do canal de restituição e da fossa de dissipação de energia, foram fortemente condicionados pelas muito adversas condições geológicas e geotécnicas da fundação, onde a existência de margas expansivas intercaladas com bancos rígidos de arenitos, ditaram o posicionamento dos principais órgãos hidráulicos da barragem. É a segunda maior barragem da África, depois da barragem de Aswan, e a maior de Marrocos.

Por parte do ML houve uma intensiva utilização dos fundos comunitários, o que permitiu a expansão da rede em cerca de 20 km. Inicialmente foi realizada a desconexão do nó da Rotunda, o que permitiu a criação de linhas independentes e a otimização da exploração. Construíram-se as linhas da Baixa, com as estações da Baixa-Chiado e do Cais do Sodrê, e a linha vermelha, da Alameda à Expo'98. A linha da Baixa constituiu uma notável realização da engenharia, com forte componente geotécnica, cuja realização representou um enorme desafio conceptual e técnico. As obras subterrâneas foram construídas com pequenas coberturas, sempre abaixo do nível freático, em terrenos constituídos por aterros, argilas moles, argilas sobreconsolidadas e areias sobreconsolidadas, com passagens de calcarenitos, numa zona da cidade onde predominam inúmeras edificações sensíveis e de elevado valor histórico e patrimonial, exigindo a minimização dos impactes ambientais. Foi necessário recorrer a soluções técnicas das mais sofisticadas até então conhecidas, nomeadamente no atravessamento de fundações muito brandas, à utilização da técnica do NATM na abertura de duas cavernas paralelas de grande seção, separadas de apenas 7 m, em

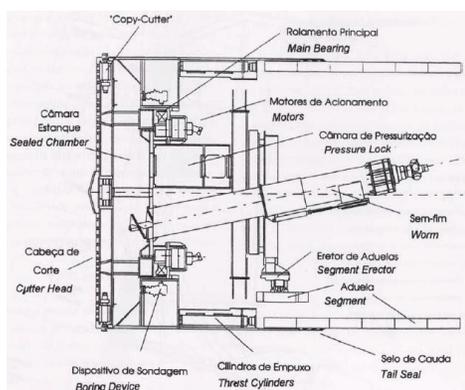


Fig. 24 - Cabeça de corte e corte do escudo da tuneladora (Bento Pedroso Construções, 2003).

solos abaixo do nível freático e com reduzido recobrimento (Maranha das Neves, 2003). Na construção das duas linhas da Baixa de Lisboa, face às condições geológicas-geotécnicas, o tipo de ocupação urbana e o comprimento dos diversos túneis a executar, optou-se pela utilização de uma tuneladora (TBM). Esta, foi utilizada em 1992, pela primeira vez em Portugal, para a construção de 803 m do túnel entre as estações Cais do Sodré e Baixa Chiado (Figura 24).

A estação Baixa-Chiado do ML é uma das mais complexas e ousadas realizadas em NATM. A estação é constituída por duas cavernas gémeas, de grandes dimensões, com comprimento de 181m (nascente) e 160 m (poente), 17,68 m de largura, 16,2 m de altura e 225,90 m² de seção (Figura 25).

Foi realizada em solos argilosos sobreconsolidados (argilas dos Prazeres) subjacentes a solos arenosos, igualmente sobreconsolidados (areolas da Estefânia), com intercalação de estratos calcareníticos.



Fig. 25 - Vista dos trabalhos de escavação das seções 1, 2 e 3 da estação Baixa-Chiado poente (Maranha das Neves, 2003).

A obra rodoviária mais relevante realizada na década foi a ponte Vasco da Gama, sobre o rio Tejo, em Lisboa. É um dos maiores projetos de infraestruturas a nível nacional e mesmo a nível europeu, contribuindo decisivamente para o desenvolvimento das acessibilidades rodoviárias nacionais. A ponte e os viadutos de acesso atravessam em todo o seu desenvolvimento o vale aluvionar do rio Tejo, que, nesta zona, atinge uma largura de mais de 12 km e uma espessura máxima de cerca de 80 m. Atravessa em toda a extensão espessos depósitos aluvionares holocénicos da baixa

aluvionar do Tejo, sobrejacentes ao substrato plio-pleistocénico e miocénico, na margem direita (Figura 26).

A ponte principal, atravessando a cala norte do rio, é uma estrutura atirantada com o comprimento de 826 m e com um vão livre de 420 m entre torres. As torres do vão central, com 148 m de altura, apoiam-se em maciços de encabeçamento sobre estacas moldadas de 2,2 m de diâmetro executadas ao abrigo de grandes ensecadeiras.

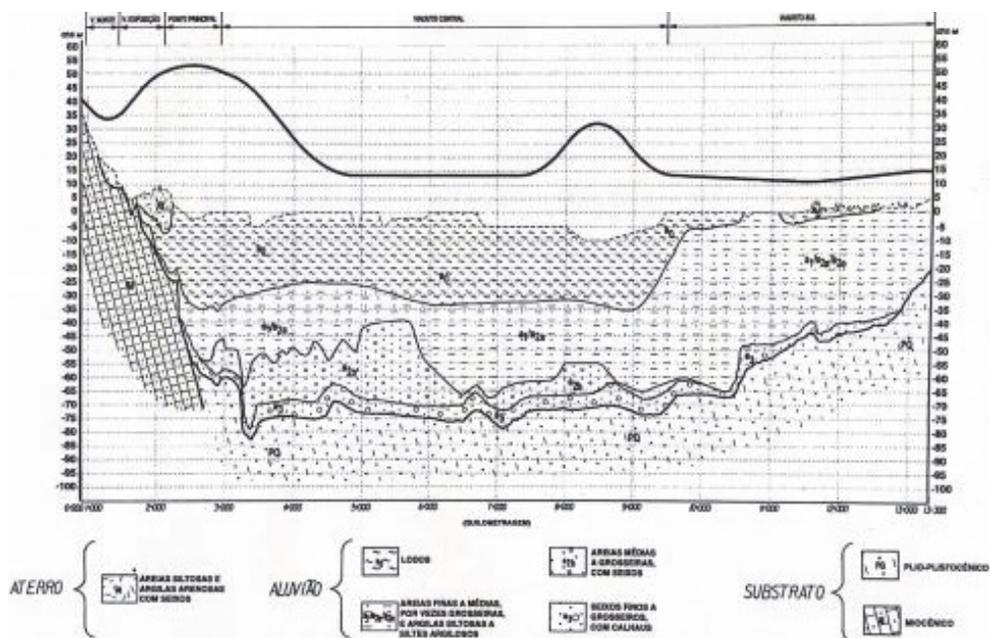


Fig. 26 - Perfil geológico da ponte Vasco da Gama (Oliveira et al, 1997).

Os principais agentes de mudança na geotecnia na década de 1990 foram:

- o desenvolvimento da construção de barragens de enrocamento;
- a explosão da construção rodoviária portuguesa;
- a construção de pontes rodoviárias de grande extensão e de grande vão;
- a construção de túneis rodoviários de grande seção;
- a construção de novas linhas do ML;
- a Declaração de Bolonha (1999).

3.8 – Década de 2000. Incremento da internacionalização da engenharia portuguesa

No início do século são de salientar os progressos significativos que continuaram a verificar-se na investigação na área da geotecnia aplicada à engenharia civil, quer no domínio da teoria com vista a repercussões na segurança e funcionalidade das estruturas geotécnicas, quer na caracterização dos materiais, quer, ainda, na inovação das tecnologias construtivas (Maranha das Neves, 2008). Por outro lado, a geotecnia continuou a assumir e a aprofundar a sua intervenção cada vez mais decisiva no desenvolvimento da sociedade na sua permanente interferência com o ambiente, quer na exploração dos recursos naturais, quer na construção das obras, quer no uso do terreno, incluindo o descarte dos resíduos resultantes destas atividades (Oliveira, 2010).

Durante a década aumentou significativamente o volume de construção de autoestradas, tendo-se concluído cerca de duas dezenas, desde o norte do país (A4 - Trás-os-Montes e Alto Douro e a AE do Grande Porto) até ao Algarve (trecho Castro Verde-Paderne da A2 e a A22 – Via Infante de

Sagres), passando pela região de Lisboa (A10 - Bucelas-Benavente e A16-Grande Lisboa). Na ilha da Madeira foi concluída a importante Via Rápida Ribeira Brava – Caniçal.

A retração do investimento nacional, a partir do ano de 2004, afetou severamente as empresas de consultoria, as quais se encontravam numa fase delicada do seu desenvolvimento. Foi, assim, que nos primeiros anos da década, as empresas de consultores nacionais estenderam a sua atividade no estrangeiro, em parte devido à sua própria iniciativa, em parte em ligação com empreiteiros nacionais que contratavam com os seus clientes, para além da construção das obras, os serviços de estudos e projetos, mais frequentemente os projetos de execução. O incremento dos trabalhos no estrangeiro esteve relacionado com a reabilitação e retoma de construção de aproveitamentos hidráulicos em Angola, com o incremento da atividade nos países do Magrebe e no Brasil e com o reinício da construção de barragens em Moçambique.

Só no final da década o Estado resolveu dar um maior impulso às obras públicas, tendo concedido à iniciativa privada uma parte significativa dos grandes empreendimentos, com forte impacto social para o país. Foram constituídos grupos concessionados, designados Parcerias Público Privadas (PPP), que desenvolveram projetos globais abrangendo as componentes de projeto, financiamento, construção e exploração, tendo sido constituídas seis subconcessões em PPP para as autoestradas.

Também, no sentido de reduzir a dependência energética de Portugal, retomou-se, em 2008, o plano de construção de grandes aproveitamentos hidroelétricos, tendo sido concessionado o importante aproveitamento hidroelétrico de Baixo Sabor.

As obras com intervenção mais relevante da geotecnia na década de 2000 foram as seguintes: as novas Autoestradas, a barragem do Sabugal (2000), os Túneis e as estações do Bolhão (2001) e de Salgueiros do Metro do Porto (MP), a barragem do Alqueva (2002), integrada no Empreendimento de Fins Múltiplos de Alqueva (EFMA), a estação do Terreiro do Paço do ML (2003), a Via Rápida Ribeira Brava-Caniçal, na Madeira (2005), incluindo os túneis de Santa Cruz Este e Oeste (2000) e o túnel duplo do Caniçal (2004), a ponte da Lezíria e o nó do Carregado (2007) e a barragem de Odelouca (2009).

Nas autoestradas destaca-se a A10 que liga a região da Área Metropolitana de Lisboa com a sub-região Lezíria do Tejo, desde Alverca até Samora Correia, com uma extensão total de 39,8 km. Do ponto de vista geotécnico, esta via foi das mais complexas, incorporando obras de grande relevo, como o túnel duplo do Mato Forte, em formações miocénicas, as significativas escavações e aterros em solos margosos, os viadutos do nó do Carregado e a ponte e viadutos da Lezíria, totalmente fundados em estacas, no atravessamento da baixa aluvionar do Tejo, onde esta tem a sua máxima largura.

Na década de 2000 continuou o ritmo de construção de barragens de aterro, mas de pequena a média dimensão. Foram construídas 31 barragens de aterro, maioritariamente de terra zonada com filtro. A barragem do Sabugal foi a barragem de aterro mais importante construída na década. Está integrada no importante Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira. Fica localizada no rio Côa, tem uma altura máxima de 58,5 m e apresenta um desenvolvimento de 1 005 m. A barragem é de terra com perfil zonado, incorporando um núcleo central em solo residual dos xistos e maciços estabilizadores, na zona interna, em xisto ripável e, na zona externa, em enrocamento de granulometria extensa de granauque ou granito.

A barragem do Alqueva, no rio Gadiana, a mais importante construída na década de 2000, fundamental para o grande projeto nacional de rega do Alentejo, é do tipo arco com 96 m de altura máxima (Figura 27). A construção desta barragem criou o maior reservatório artificial de água da Europa Ocidental, também chamado de Grande Lago. Tem quase 100 km de extensão e uma capacidade de 4 150 Mm³. A barragem está fundada num maciço muito heterogéneo que, na margem direita e no fundo do rio, é constituído por xisto verde de boa qualidade e, na margem esquerda, por filádio de razoável qualidade, que é atravessado por numerosas falhas, de que se destaca a falha 22 que possui uma caixa de espessura variável entre 0,8 m e 4 m. A influência desta



Fig. 27 - Vista aérea da barragem do Alqueva e perfil radial do tratamento de substituição do material na fundação da margem esquerda (Lima et al, 2021).

falha sobre o comportamento estrutural da barragem justificou que ela fosse objeto de um tratamento específico que consistiu na substituição do material da caixa de falha.

Em 2003 foi concluída a abertura dos túneis da extensão da linha A (azul) e da linha D (amarela) do MP. Estes túneis ligam Campanhã à Trindade, com 2 300 m de extensão, e o Pólo Universitário à ponte Luiz I, com 4 200 m de extensão. Atravessam zonas de granitos quase são a muito alterados, ocorrendo com frequência passagens bruscas de granitos são para granitos muito alterados. Situam-se praticamente ao longo de todo o traçado abaixo do nível freático. Face às difíceis condições da envolvente e com o objetivo de ter o menor impacto possível à superfície, o método de escavação escolhido foi o da utilização de tuneladora do tipo EPB, com uma cabeça de corte com 8,7 m de diâmetro e um escudo com comprimento de 8,5 m de e peso de 670 ton. Ao longo deste traçado dos túneis foram construídas 11 estações, sendo cinco em subterrâneo (Heroísmo e Bolhão, na linha A, e Combatentes, Marquês e Faria Guimarães, na linha D), e seis a céu aberto, do tipo cut-and-cover (Campo 24 de Agosto, na linha A, e Pólo Universitário, Salgueiros, Trindade, Aliados e São Bento, na linha D).

De entre as estações subterrâneas do MP merece referência especial a estação do Bolhão. Situa-se numa zona densamente urbanizada, no centro da atividade comercial da cidade, com a Igreja das Almas (património histórico da cidade) numa das suas esquinas e o tradicional Mercado do Bolhão na outra. É constituída essencialmente por uma caverna principal onde se localiza o cais, com um comprimento de 70 m e uma secção de escavação de 186 m² e por uma galeria transversal de direção ortogonal à primeira, com um comprimento de 62 m e secção circular de 160 m². Na intersecção das



Fig. 28 - Zona de intersecção das galerias da Estação do Bolhão após conclusão da escavação (Pistone et al, 2009).

duas galerias, a altura da secção da caverna é aumentada num troço com cerca de 20 m de extensão, passando a secção de escavação a ter 244 m² (Figura 28).

De entre as estações a céu aberto do MP é de salientar a estação Salgueiros, concluída em 2005. Tem uma conceção estrutural arrojada, que viabilizou uma execução rápida e eficiente, sem escoramentos intermediários e ancoragens, com uma área transversal livre 2 700 m² ao longo de toda a altura de escavação. A conceção aproveita ao máximo as virtudes de uma geometria arredondada do revestimento, composta por um par de elipses e travada por um pórtico de grandes dimensões, constituído por uma viga única ao nível da superfície e por dois poços auxiliares construídos pelo prático método NATM. Na área de implantação da estação, ocorrem essencialmente solos residuais de granito com diversos graus de alteração. Os poços auxiliares situados nos pontos de intersecção das elipses, têm um diâmetro interno de 3,3 m, com uma distância aproximada entre eixos de 30 m.

A viga de travamento tem 2 m de altura e 1,6 m de largura. Os dois poços, juntamente com viga transversal superior, formam a espinha dorsal de sustentação de toda a estrutura da estação (Figura 29). Após a construção dos poços auxiliares, da viga de travamento e da viga de bordo, os poços elípticos foram escavados pelo método NATM, atravessando em quase toda a sua altura de 24 m, solos pouco competentes, sendo a sua base apoiada em rochas brandas a duras. O revestimento primário da estação apresenta espessura crescente em função dos carregamentos que variam com a profundidade. A espessura do primário começa com 0,35 m, passa para 0,45 m e depois para 0,60 m (Andrade, 2014). Esta inovadora tecnologia de poços circulares ou elípticos profundos, de grande secção em planta, construídos pelo método sequencial, aplicada com sucesso em maciços de solos residuais, foi desenvolvida pela engenharia brasileira, no virar do século.

Na Ilha da Madeira, a Via Rápida Ribeira Brava-Caniçal, com duas vias em cada sentido e extensão de cerca de 45 km, com condições geomorfológicas muito heterogéneas, características dos ambientes vulcânicos, destaca-se pela diversidade das soluções estruturais com um significativo conjunto de obras de arte especiais, que representam cerca de 50% do mesmo. Esta via rápida constitui a obra rodoviária mais relevante realizada na ilha e uma das grandes obras geotécnicas portuguesas do final do século XX. Nesta via destacam-se os túneis de Santa Cruz Este e Oeste, com baixo recobrimento, em formações vulcânicas muito heterogéneas, onde predominam as formações brechóides desagregáveis. Os túneis têm quatro vias, duas em cada sentido, e um separador central, com uma largura útil mínima entre hasteais de 18,5 m e um vão de escavação de 20,2 m, sendo os mais largos da ilha da Madeira. A secção máxima de escavação é de 182 m². Têm o mesmo desenvolvimento de 135 m e idêntico recobrimento médio de 20 m (Figura 30).



Fig. 29 - Vista 3D e vista aérea do poço duplo elíptico contruído pelo método sequencial de escavação-betonagem da Estação Salgueiros (Andrade, 2014).



Fig. 30 - Vistas da execução do rebaixo e do portal oeste do túnel de Santa Cruz Oeste.

Das obras do ML há a salientar a conclusão, em 2007, da estação do Terreiro do Paço. Em termos simplificados, a estrutura da estação corresponde a uma grande caixa de betão armado, construída a partir da superfície do terreno, ligada ao túnel nos dois portais, distanciados de cerca de 140 m e com uma largura de 16 m na zona estreita e de 24 m na zona larga (Figura 31). O teto do substrato ocorre ligeiramente abaixo da base da laje de fundo da estação. Ocorrem, à superfície, aterros com espessura muito variável, por vezes misturados com aluviões, contendo pedras e obstáculos, por vezes de grandes dimensões. Seguem-se as aluviões predominantemente argilodosas, englobando desde lodos muito brandos a areias (algumas muito limpas). Nota-se uma predominância muito significativa das areias limpas na base das aluviões. Subjacente às aluviões, ocorrem as formações do Miocénico, constituídas por argilas do Forno do Tijolo, de consistência rija, intercaladas por camadas de areias densas com artesianismo. A cortina de contenção é constituída por estacas secantes de betão armado e de bentonite-cimento com 1,50 m de diâmetro. Previamente foram executadas as estacas de bentonite-cimento com afastamento ao eixo de 1,75 m. Em seguida foram construídas, alternadamente com as primeiras e seccionando-as parcialmente, as estacas de betão armado com afastamento ao eixo também de 1,75 m. Todas as estacas penetraram, no mínimo, 8 m no substrato miocénico. Para o sistema de escoramento provisório foram adotados cinco níveis de pares de escoras horizontais, entre as faces longitudinais (norte e sul) da cortina, constituídas por perfis tubulares de aço de grande diâmetro $\phi 711$ mm e espessura de 16 a 25 mm, com espaçamento horizontal médio de 3,5 m.



Fig. 31 - Vista da obra a partir do torreão poente da praça do Terreiro do Paço (Mateus de Brito e Matos Fernandes, 2014).

As escoras foram fortemente pré-esforçadas durante a instalação, com um pré-esforço uniforme de 3 500 kN por escora, introduzido por 4 macacos hidráulicos. Na zona nascente (larga) da estação as escoras foram dotadas de elementos de contraentamento no plano vertical em dois pontos apoiados em estacas metálicas $\phi 800$ mm preenchidas com betão, fundadas no substrato e instaladas previamente à escavação. Este sistema foi complementado, na zona larga da estação, com uma laje de jet grouting com 3 m de espessura, entre 18 e 21 m de profundidade, disposta entre o túnel existente, previamente preenchido com betão pobre, e as cortinas longitudinais. A escavação foi executada em 5 fases, até atingir a profundidade de 26,5 m (Mateus de Brito e Matos Fernandes, 2014).

A ponte da Lezíria sobre o rio Tejo é a terceira ponte mais extensa da Europa e considerada como a maior obra pública da década de 2000 (Figura 32). Estende-se por cerca de 11,6 km (ponte e viadutos norte e sul), atravessando as luxuriantes paisagens das lezírias ribatejanas. A ponte é parte integrante da circular externa da grande Lisboa, ligando, através do nó do Carregado, as autoestradas A1 e A10, na margem direita, à autoestrada A13, na margem esquerda. É constituída pelo viaduto norte com 1,5 km, a ponte com 1 km, com o tabuleiro a uma altura de 23 m sobre o rio, e o viaduto sul com 9,1 km de extensão.

No local ocorrem, em toda a extensão, as aluviões holocénicas, assentes num substrato Terciário. A espessura das aluviões varia entre os 35 e os 55 m ao longo de cerca de 9 km. Foi identificada uma espessura máxima da ordem dos 62 m. O enchimento aluvionar é constituído por lodos mais ou menos arenosos, anegrados, areias mais ou menos lodosas e areias médias por vezes silto-argilosas. Na transição da série aluvionar para o substrato Miocénico subjacente ocorre um nível de carácter areno-cascalhento, constituído por areias grossas a médias com abundantes passagens de seixos e calhaus siliciosos rolados a sub-rolados de dimensões variáveis. Como critério geral para fundar a ponta das estacas no Miocénico, definiu-se uma linha de fundação de 3ϕ a partir de camadas de solo com $N_{SPT} \geq 55$ pancadas (incluindo por vezes solos da unidade areias e seixos, quando esta ocorre com maior espessura e apresenta de forma consistente valores N_{SPT} elevados). Nos viadutos norte e sul, com vãos de cerca de 40 m, as fundações são constituídas por 4 estacas com $\phi 1,5$ m, agrupadas em alinhamentos transversais. Na ponte, com vãos da ordem de 130 m, as fundações são constituídas por grupos de estacas com $\phi 2,2$ m. Estas atingiram uma profundidade máxima de 55 m (Oliveira et al, 2005). Para a sua execução recorreu-se à cravação de entubamento metálico por meio de vibrofonceur ou por martelo hidráulico, sendo efetuada no interior do mesmo a furação através de vara telescópica Kelly. O entubamento foi perdido nas estacas de fundação dos pilares da ponte, sendo recuperado nas fundações dos restantes elementos estruturais. A limpeza do fundo do furo foi efetuada através do sistema air-lift. Os maciços foram executados ao abrigo de caixões prefabricados em betão armado, que serviram de cofragem perdida. Estes caixões foram



Fig. 32 - Vistas da ponte e da execução da furação no interior dos tubos molde metálicos das estacas da ponte.

prefabricados no local e apoiados provisoriamente nas camisas metálicas das estacas definitivas. Nas estacas foram executados 3 ensaios de carga verticais estáticos à compressão (em estacas de $\phi 0,8$ m), 1 ensaio de carga horizontal estático (numa estaca de $\phi 1,5$ m) e 9 ensaios de carga dinâmicos à compressão (em 7 estacas de $\phi 0,8$ m, onde se incluem as dos ensaios estáticos e em 2 estacas de $\phi 1,5$ m). Os ensaios foram realizados para distintas condições de encastramento das estacas: estaca com 3ϕ de encastramento no Miocénico ($L=53$ m); estaca com 3ϕ de encastramento na unidade geotécnica de areias com seixos e calhaus ($L=44$ m) e estaca com $1,0$ m de encastramento no Miocénico ($L=55$ m).

Com a conclusão da ponte do Carregado, também ficou concluído o nó de interligação da A10 com a A1, conhecido como o nó do Carregado (Figura 33), ficando a constituir uma das mais importantes obras rodoviárias da década de 2000 realizada em Portugal. Este nó fica situado na baixa aluvionar do Carregado, sendo constituído fundamentalmente por viadutos fundados em estacas, que atingiram comprimentos máximos de 35 m e por trechos em aterros, com uma altura máxima altura máxima limitada a 4 m. A obra de arte mais importante é o viaduto da A10 no atravessamento da A1, com uma extensão total de 1 238 m.



Fig. 33 - Nó de Interligação A10 com a A1 visto segundo a A1, de sul para norte.

A barragem de Odelouca, integrada no Aproveitamento Hidráulico de Odelouca, com a finalidade de abastecimento de água ao barlavento algarvio, é a segunda barragem de terra mais alta de Portugal, com 76 m de altura máxima acima da fundação. É uma barragem de enrocamento com núcleo argiloso, a mais alta deste tipo no país. Foi construída maioritariamente com materiais do local, principalmente, xistos, grauvaques e argilas (Figuras 34 e 35).

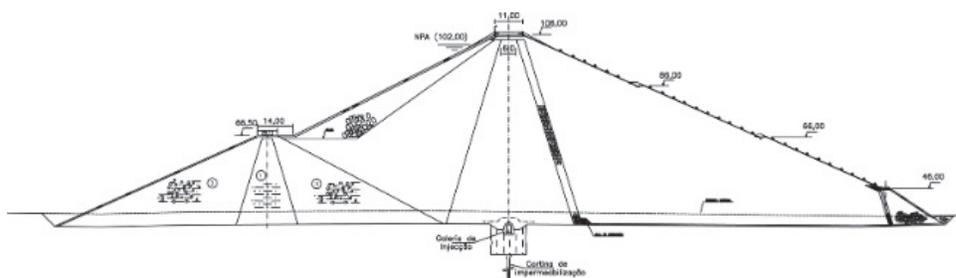


Fig. 34 - Perfil transversal da barragem de Odelouca.



Fig. 35 - Vista da escavação e do aterro da barragem a partir da margem esquerda e vista de jusante da barragem de Odelouca.

Os principais agentes de mudança na geotecnia na década de 2000 foram:

- os progressos significativos na investigação na área da geotecnia aplicada à engenharia civil no domínio da teoria, na caracterização dos materiais e na inovação das tecnologias construtivas;
- o grande volume de construção de autoestradas em todo o Continente e na ilha da Madeira, as quais incluíram a construção de inúmeras pontes e de túneis e de obras de aterro e de estabilização de taludes;
- a continuação da expansão dos metropolitanos de Lisboa e do Porto;
- o incremento dos trabalhos realizados pelas empresas portuguesas de projeto no estrangeiro na reabilitação e retoma de construção de aproveitamentos hidroelétricos em Angola, nos países do Magrebe, no Brasil e em Moçambique, por vezes em ligação com empreiteiros nacionais;
- a forte retração do investimento a partir de 2004, o que afetou severamente as empresas do sector da consultoria.

3.9 – Década de 2010. Retração do investimento público

A partir de 2010 houve uma retração significativa do investimento público, o que levou o Governo a suspender alguns projetos de infraestruturas, sendo as empresas de consultoria e as construtoras obrigadas a procurar aumentar a sua atividade nos mercados exteriores em África, Ásia e América Latina, nomeadamente em Angola, Moçambique, Argélia e Brasil.

Dos novos aproveitamentos hidroelétricos desta década, destacam-se o de Baixo Sabor, com central em poço com 189 MW, o de Ribeiradio-Ermida (2015) com central em poço com 82,3 MW e o de Foz Tua, com central em poço de 270 MW, bem como a entrada em serviço de mais nove reforço de potência de aproveitamentos da EDP, com circuitos hidráulicos subterrâneos. São de destacar Alqueva II (2012), com central de 224 MW, na margem direita, e de Venda Nova II (2017), com central de 780 MW, em caverna. Em 2017, foi concluído um novo reforço de potência em Venda Nova, passando a respetiva central (Frades II) a ser a central hidroelétrica da EDP com maior potência instalada (927 MW).

Finalmente, entraram em vigor os Eurocódigos Estruturais (despacho normativo 21/2019 de 16 de dezembro), com um período de transição de 3 anos. Assim, em 16 de dezembro de 2022 os Eurocódigos assumiram a forma de Normas Europeias (EN), elaboradas pelo Comité Europeu de Normalização (CEN). A entrada em vigor destes Eurocódigos representou um desafio importante para a evolução e atualização dos projetos de estruturas nacionais, assim como para as trocas de

serviços de engenharia entre os estados-membro, facilitando as oportunidades de internacionalização das empresas nacionais.

As obras com intervenção mais relevante da geotecnia na década de 2010 foram as seguintes: a ampliação do Terminal XXI do Porto de Sines (2012), o circuito hidráulico de interligação Odelouca-Funcho (2013), o reservatório do Cerro da Mina (2014), a autoestrada do Marão, com importantes taludes de aterro em solo-cimento e o túnel do Marão (2016), o reforço de potência de Venda Nova III com a central dos Frades II (2017), as barragens de Baixo Sabor (2016), de Ribeiradio e de Foz Tua (2018) e o Metro de Argel, com destaque para a estação Place des Martyres (2018).

Com a conclusão da 2.^a e 3.^a fases da ampliação do cais do Terminal XXI-Terminal de Contentores de Sines, a extensão total de cais acostável passou para 940 m. A solução consistiu num cais sobre estacas com tabuleiro betonado in situ sobre cimbre móvel, resultante da importação da tecnologia utilizada na construção de pontes rodoviárias. As estacas, que constituem a fundação do tabuleiro, são cravadas nos solos moles, furadas no maciço rochoso que materializa o respetivo encastramento e betonadas por meios flutuantes. Com recurso a um sistema de cofragem autolançado assente sobre as estacas, o tabuleiro foi então totalmente betonado no local (Figura 36).

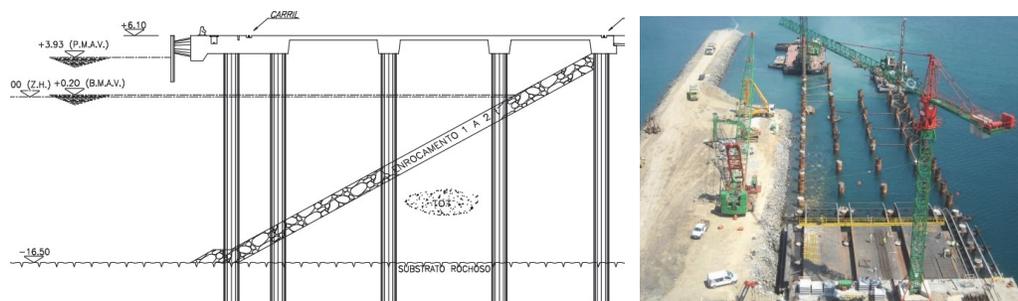


Fig. 36 - Seção transversal e vista geral dos trabalhos em 06-2010 das fases 2 e 3 do cais do Terminal XXI de Sines (Linhares, 2012).

O circuito hidráulico de interligação Odelouca-Funcho é constituído por um plano inclinado sobre a encosta da albufeira, um túnel com diâmetro interior de 2,4 m e uma extensão de 8 150 m, escavado com uma tuneladora (Figura 37), ligação ao túnel com dois poços com 40 m de altura e 3 m de diâmetro, estrutura de regulação de caudais constituída por um tanque circular com 10 m de diâmetro e 16 m de altura e câmara de válvulas.



Fig. 37 - Vista da tuneladora pronta para executar o túnel Odelouca-Funcho.

O Reservatório do Cerro da Mina (Figura 38) tem um volume de armazenamento de 1,45 Mm³. Integra uma barragem com cortina de impermeabilização em geomembrana, com 30 m de altura, a

mais alta deste tipo construída em Portugal. Tem como função o armazenamento de águas residuais resultantes do processo produtivo da Mina de Neves-Corvo. No local da obra ocorre uma sucessão de sedimentos greso-pelíticos em camadas sub-horizontais, onde se incluem grauvaques, siltitos e pelitos. Os grauvaques predominam nos taludes em escavação do reservatório. Tendo em conta a composição química das águas armazenadas e o tipo de aterro adotado, foi preconizada a impermeabilização de toda o reservatório recorrendo a um sistema duplo, constituído por uma geomembrana em PEAD com 2,5 mm de espessura, lisa em ambas as faces e superfície exposta de cor branca, e um geossintético bentonítico.



Fig. 38 - Vista do reservatório do Cerro da Mina em operação (Tavares et al, 2021).

O Túnel do Marão insere-se na denominada Estrada Europeia 82 - E82, que se inicia no Porto, prolongando a autoestrada A4 até Bragança e Espanha. É constituído por dois túneis gêmeos com comprimento de 5 667 m, sendo o túnel rodoviário mais comprido da Península Ibérica (Figura 39).

O túnel cruza o flanco sul da Serra do Marão, numa zona de relevo bastante acidentado, caracterizada por linhas de crista muito elevadas e uma rede hidrográfica muito encaixada. Os terrenos atravessados compreendem formações xistentas, afetadas por metamorfismo de contacto relacionado com a instalação do granito de Amarante. O sistema de compartimentação regional é bastante complexo, devido à ocorrência de duas importantes falhas, uma das quais foi intersectada pelo túnel ao longo de uma vasta zona.



Fig. 39 - Portal este do túnel do Marão.

A Estação Place des Martyres, a mais importante estação subterrânea do metro de Argel, é caracterizada por uma geometria bastante complexa, com um corpo principal com 144 m de comprimento dividido por uma nave central, com 26,0 m de largura e 19,2 m de altura (Figura 41) e duas naves de extremidade, com 18,4 m de largura e 16,4 m de altura, dois acessos e um poço de ventilação. Este poço acabou por ser utilizado como poço de ataque, quer ao corpo principal da estação (por intermédio de uma galeria de prospecção), quer ao próprio túnel de via. Note-se que o recobrimento médio da estação, da ordem de 18 m, é inferior ao diâmetro equivalente da sua secção

transversal e compreende sobretudo xistos alterados e fraturados, o que concorria para que qualquer instabilidade local rapidamente pudesse progredir até à superfície, com consequências potencialmente catastróficas. A escavação foi feita ao abrigo de suporte constituído por 0,4 m de betão projetado armado associado à instalação de cambotas em perfil metálico HEB240, que previa a execução de invertis provisórios em todas as fases de escavação (galeria-piloto, meia-seção superior e dois rebaixos). Refere-se ainda o facto de se haver tirado partido da referida galeria de prospeção (escavada em todo o comprimento da estação) para pré-tratar o maciço envolvente com injeções de calda de cimento, bem como a necessidade de paralelamente instalar pregagens radiais em fibra de vidro, injetadas, como forma de assegurar a estabilidade do maciço na zona dos alargamentos laterais para a meia-seção superior (cuja localização foi ajustada em fase de obra, por forma a coincidir com a zona em que o maciço apresentou melhor qualidade), a partir dos quais se executaram as enfilagens tubulares injetadas, necessárias ao pré-suporte dos subsequentes alargamentos frontais (Conceição et al, 2012).

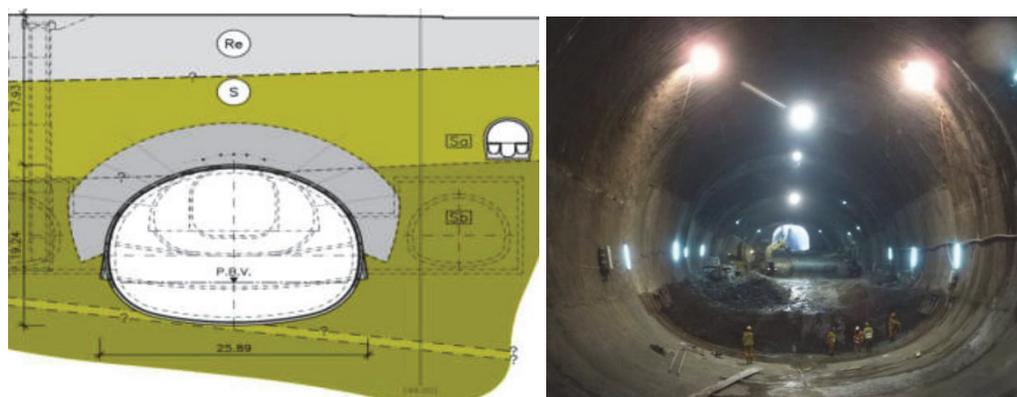


Fig. 40 - Secção transversal e vista da secção final da nave central da Estação Place des Martyres em Argel (Conceição et al, 2012).

Os principais agentes de mudança na geotecnia na década de 2010 foram:

- a retração significativa do investimento público;
- a procura das empresas de consultoria e das construtoras para aumentar a sua atividade nos mercados exteriores em África e na América Latina;
- a conclusão de importantes obras geotécnicas no estrangeiro, projetadas e construídas pela engenharia portuguesa;
- a construção da autoestrada do Marão com importantes taludes de aterro em solo-cimento e o túnel do Marão
- a entrada em vigor dos Eurocódigos Estruturais, em dezembro de 2019.

4 – CONCLUSÕES

O desafio lançado pela ISSMGE, através do projeto HTC, foi uma oportunidade única para divulgar as principais realizações e o estado atual da engenharia geotécnica portuguesa. Foi realizado um trabalho de reflexão sobre a trajetória de desenvolvimento da geotecnia nacional nos últimos 100 anos, desde os primeiros passos da geotecnia, dados até ao final da década de 1940, passando pelo período dos anos de 1950/60, em que se iniciou a constituição de uma comunidade geotécnica no país, até aos últimos anos da década de 2010.

Nos últimos 70 anos, Portugal progrediu de um país atrasado para um país que possui hoje quase todas as características dos países desenvolvidos. Assim, para fazer a história do desenvolvimento

da geotecnia, foi necessário abordar, de forma sucinta, o papel da engenharia civil, da qual a engenharia geotécnica emana, e o desenvolvimento social, económico e político do país.

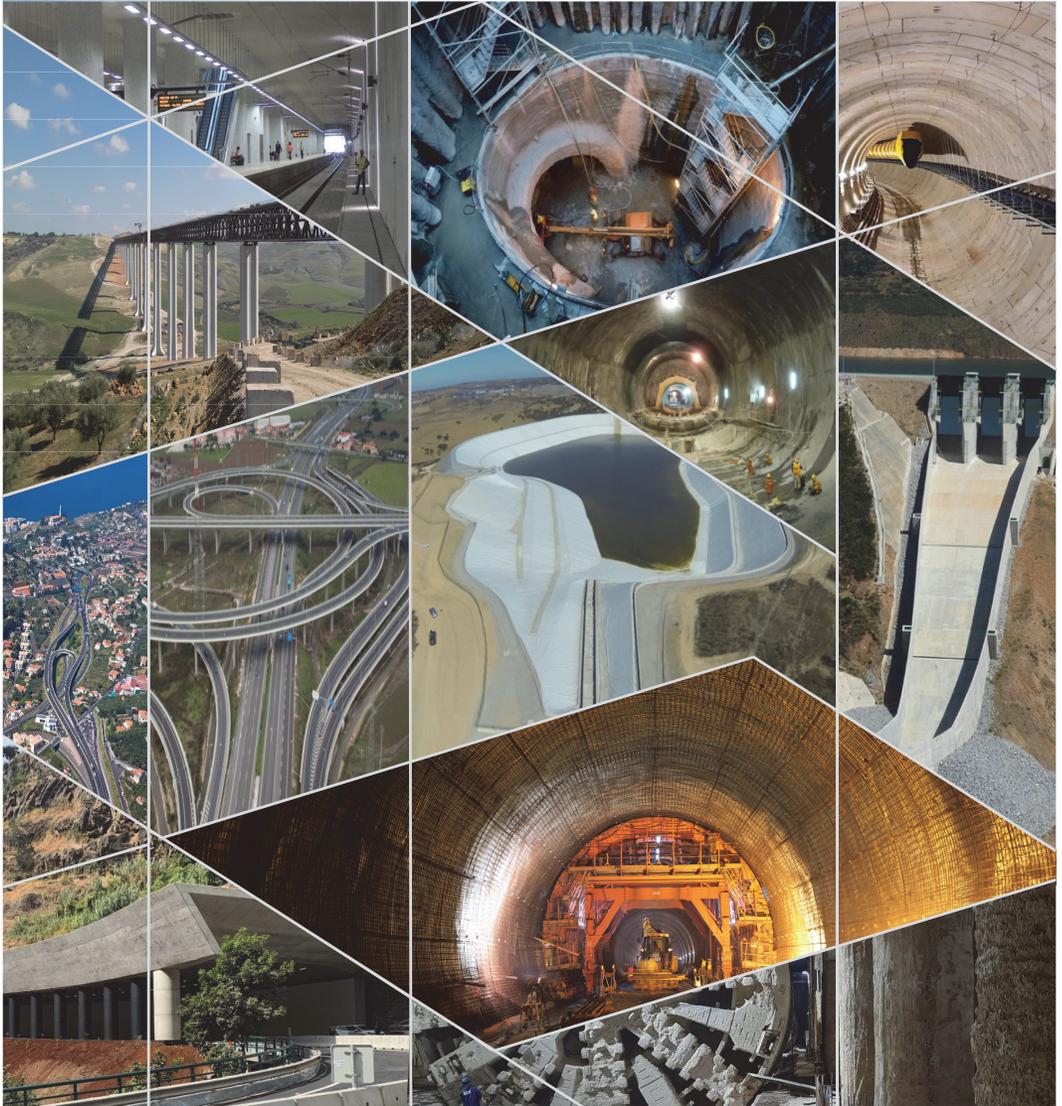
As obras selecionadas são alguma das que se caracterizam por terem condições geológicas condicionantes e aspetos geotécnicos relevantes, traduzindo aspetos inovadores de conceção e dimensionamento e de execução, que marcaram o seu tempo, e que, seguramente, servem de referência para a prática da engenharia geotécnica.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abecassis, D. (1939). *O projeto e a execução da primeira fase das Obras do Porto de Vila Real de Santo António*. Revista Técnica 99, fevereiro.
- Andrade, J. C. (2014). *Estação Salgueiros do Metropolitano do Porto*. Livro Túneis em Portugal. CPT. SPG. LNEC (edição bilingue português e inglês).
- Bento Pedroso Construções (2003). *Desafios de engenharia em Portugal*. FEUP Edições.
- Conceição, M.; Baião, C.; Santos, A.; Oliva, R.; Cruz, F.; Prado, R. (2012). *Metro de Argel. Linha-Extensão A-Place Emir Abdelkader-Place Des Martyres. Conceção geral das estações subterrâneas*. 13º Congresso Nacional de Geotecnia. Lisboa.
- Cruz, A. A.; Mineiro, A. J. C.; Coutinho, J. A. (2007). *António de Carvalho Quintela. Professor, Engenheiro e Investigador*. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH).
- Lima, C.; Esteves, C.; Oliveira, M. A.; Resende, M. E.; Plasencia, N. (2021). *Obras subterrâneas nos aproveitamentos hidroelétricos em Portugal*. Geotecnia 152, pp. 187-249.
https://doi.org/10.14195/2184-8394_152_6
- Linhares, M. P. C. (2012). *Tecnologia e gestão das construções de obras portuárias - Estudo de caso*. Tese de mestrado. ISEP.
- Maranha das Neves, E. (1987). *Barragens de aterro. Experiência portuguesa*. Conferência Ibero-Americana sobre Aproveitamentos Hidráulicos, vol. 3, pp. 63-98, Lisboa. LNEC.
- Maranha das Neves, E. (2003). *Obras do Metropolitano na Baixa de Lisboa. Desafios de engenharia em Portugal*. Bento Pedroso Construções. FEUP Edições.
- Maranha das Neves, E. (2008). *Breves reflexões sobre a engenharia*. Lição de jubilação. 16 de dezembro. IST. Lisboa.
- Maranha das Neves, E. (2011). *A regulamentação da segurança das pequenas barragens. Situação atual. a engenharia dos aproveitamentos hidroagrícolas: atualidade e desafios futuros*. LNEC, 13 a 15 de outubro.
- Mateus de Brito, J.; Baião, C. O. (1997). *Dique perimetral e sistema de revestimento de impermeabilização do reservatório de Santo Estevão*. 6º Congresso Nacional de Geotecnia. IST. 1997.
- Mateus de Brito, J.; Matos Fernandes, M. (2014). *Estação Terreiro do Paço do Metro de Lisboa*. Livro Túneis em Portugal. CPT. SPG. LNEC (edição bilingue português e inglês).
- Matos Fernandes, M. (2010). *Deep urban excavations in Portugal: practice, design, research and perspectives*. Soils and Rocks, 33 (3), pp.115–142. Lição Manuel Rocha.
<https://doi.org/10.28927/SR.333115>

- Matos Fernandes, M.; Cardoso, A.; Guerra, N. (2021). *Grandes escavações em meio urbano. Uma perspetiva sobre as soluções construtivas e os sistemas estruturais para o seu suporte*. Revista Geotecnia 152, pp. 531-554. https://doi.org/10.14195/2184-8394_152_17
- Mineiro, A. J. C. (1978). *Comportamento sísmico de barragens de terra. Previsão do deslocamento permanente*. Geotecnia 24, pp. 89-130. https://doi.org/10.14195/2184-8394_24_7
- Nascimento, U. (1990). *Contribuição para a História da Geotecnia em Portugal*. Geotecnia 58, pp. 3-16. Conferência proferida na Ordem dos Engenheiros em 17/11/1987. https://doi.org/10.14195/2184-8394_58_1
- Oliveira, R.; Seco e Pinto, P.; Rebelo, V.; Rodrigues, V. (1997). *Estudos Geológicos e Geotécnicos para o Projeto da Ponte Vasco da Gama, em Lisboa*. 6º Congresso Nacional de Geotecnia. Lisboa.
- Oliveira, R.; Rebelo, V.; Jeremias, F.T.; Coelho, G.; Sardinha, R. (2005). *Estudos Geológicos e Geotécnicos Relativos ao Projeto Base da Nova Travessia do Rio Tejo, no Carregado*. X Congresso Nacional de Geotecnia. Lisboa.
- Oliveira, R. (2010). *Geologia de engenharia. Génese, evolução e situação atual*. Geotecnia 118, pp. 3-13, março. https://doi.org/10.14195/2184-8394_118_1
- Pistone, R.; Melâneo, F. (1995). *Projeto do túnel de Carenque – A9, CREL*. 5º Congresso Nacional de Geotecnia. Universidade de Coimbra.
- Pistone, R.; Maia, C.; Bento, J. (2009). *Metropolitano do Porto. Estação do Bolhão. Projeto de escavações e suporte*. 9º Congresso Nacional de Geotecnia. Universidade de Aveiro.
- Plasencia, N. (2014). *Túneis hidroelétricos. Nota introdutória*. Túneis em Portugal. CPT. SPG. LNEC.
- Revista Técnica 265 (1956). *Metropolitano de Lisboa*. Outubro.
- Rocha, M.; Laginha, S. (1950). *Ensaios sobre modelo da Barragem de Santa Luzia*. Revista Técnica 250, dezembro.
- Rodrigues, L. F. (2016). *A ponte inevitável. A história da ponte 25 de Abril*. Guerra & Paz.
- Silva Gomes, A.; Silva, J. D.; Pinheiro, A. N. (2004). *Barragens. Obra, engenho e arte nas raízes da engenharia em Portugal. Momentos de inovação e engenharia em Portugal no século XX*. Edição de Manuel Heitor et al., vol. 2 pp 821-859. D. Quixote.
- SPG (1997). *Eurocódigo 7. Projeto Geotécnico*. 22 a 24 de outubro. LNEC.
- SPG (2021). *Sobre a Sociedade Portuguesa de Geotecnia*. Acedido em 30 de março de 2023, em: <https://www.spgeotecnia.pt/pages/1>.
- Tavares, G.; Mateus de Brito, J.; Romeiro, M.; Oliveira, M.; André, S.G. (2021). *Reservatório do Cerro da Mina, Minas de Neves Corvo*. Geossintéticos em Engenharia Civil. Dimensionamento, Instalação e Casos de Obra. Comissão Portuguesa de Geossintéticos. SPG.
- Xerez, C. (1939). *Levantamento estereofotogramétrico terrestre na escala 1:250 do local para a barragem de Santa Luzia*. Revista Técnica 100, março.
- Xerez, C. (1954). *O Aproveitamento do Cabril*. Revista Técnica 243, junho.

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



- > **Prospecção Geotécnica**
Site Investigation
- > **Consultoria Geotécnica**
Geotechnical Consultancy
- > **Obras Geotécnicas**
Ground Treatment-Construction Services
- > **Controlo e Observação**
Field Instrumentation Services and Monitoring Services
- > **Laboratório de Mecânica de Solos**
Soil and Rock Mechanics Laboratory

Certificada ISO 9001 por



Geocontrolo



Parque Oriente, Bloco 4, EN10
2699-501 Bobadela LRS
Tel. 21 995 80 00
Fax. 21 995 80 01
e.mail: mail@geocontrole.pt
www.geocontrole.pt



PIONEERING AND INNOVATION

SINCE 1921

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

PORT FACILITY CONSTRUCTION
NACALA - MOZAMBIQUE



Building a better world.
teixiraduarteconstruction.com

LICENCE NO. 24 - PUB



Safety is our nature

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

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



Petrópolis/RJ-Brasil

SEGURANÇA É A NOSSA NATUREZA

Estabilização de taludes |
Slope stabilization

Queda de rochas |
Rockfall

Escorregamento Superficial |
Shallow landslides

Corridas detríticas |
Debris flow

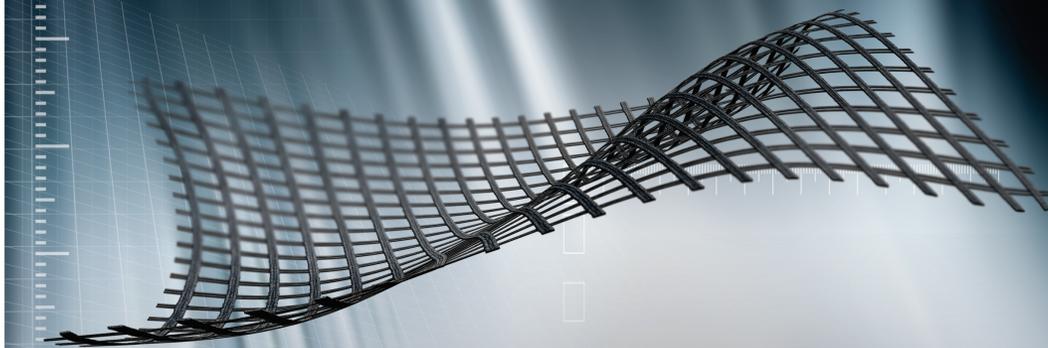
Escavações subterrâneas |
Underground support

Para mais informações, acesse
www.geobruigg.com



HUESKER

Ideen. Ingenieure. Innovationen.



HUB DE CONTEÚDO HUESKER BRASIL

Confira conteúdo exclusivo sobre aplicações com Geossintéticos em obras pelo mundo!

Ebook de Casos de Obras

Relatórios exclusivos de Obras

Ebook de Pesquisas/Artigos

Coletâneas de Vídeos

Escaneie o código ou acesse o link abaixo para ter acesso ao HUB de conteúdo:



Encontre a HUESKER Brasil nas Mídias Sociais:



www.HUESKER.com.br

www.linktr.ee/hueskerbrasil



LEIA-ME!

The Best Solution!

Tecnilab Portugal, S.A. will provide you with answers to your Geotechnical engineering needs.

Tecnilab Portugal, S.A. is a professional Geotechnical engineering company and has a lot of experience as a professional group that mainly engages in measurement engineering in dam, subway(Metro), harbor, power plant, soft ground and structure construction.

WE ARE THE DISTRIBUTOR OF PORTUGAL OF ACE INSTRUMENT CO., LTD. IN KOREA.

ACE INSTRUMENT CO., LTD. is a company that obtains worldwide reputation for supplying high precision, high reliability products in all Geotechnical instruments, data logger and in-situ test equipments. Independently developed automatic monitoring system can be used anywhere in the world, including buildings, bridges, ground and any constructions.

Data Acquisition System & Web Monitoring Program



Geotechnical Instruments



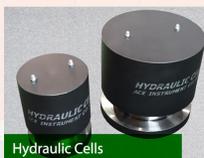
Digital Incliner Set



Dataloggers, Indicators



Portable Digital Tiltmeter



Hydraulic Cells



Inclinometer Casings



In-Situ Test Equipments



Pendulum System

Sales company



Tecnilab Portugal, S.A.
A: Rua Gregorio Lopes, Lote 1512B 1449-041 Lisboa Portugal
T: +351 217 220 870 F: +351 217 264 550
www.tecnilab.pt

Manufacturer



ACE INSTRUMENT CO., LTD.
The first value in Geotechnical & Structural Instrumentation
A: 9, Dangjung-ro 27 beon-gil, Gunpo-si, Gyeonggi-do, Korea
T: +82 31 459 8753-7 F: +82 31 459 8758 E: acens@naver.com
www.aceinstrument.com



GABIÃO BELGO. UMA ESCOLHA PARA ELEVAR A QUALIDADE DA SUA OBRA.



A linha **Belgo GeoTech** traz ao mercado soluções em aço para aplicações geotécnicas. Entre os nossos produtos, disponibilizamos **gabiões**, **malhas talude**, **fibras de aço Dramix®**, **telas de fortificação**, **cordoalhas** e **barras helicoidais**. Mas também oferecemos suporte técnico qualificado para atender a todas as necessidades do seu projeto. **Aqui se faz geotecnia com a força do aço.**



Saiba mais em: belgogeotech.com.br

BELGO
GeoTech

Belgo Bekaert Arames





**TRANSFORMATIVE
ENGINEERING,
MANAGEMENT,
AND INNOVATION
DELIVERING RESULTS**



DF+ IS AN INTEGRATED ENGINEERING CONSULTING FIRM WITH OVER 25 YEARS OF EXPERIENCE IN THE SECTORS OF MINING, INFRASTRUCTURE, AGRIBUSINESS, AND INDUSTRIAL.

WE DEVELOP PROJECTS BASED ON CONSOLIDATED TECHNICAL SOLUTIONS THAT ENCOMPASS THE STATE OF THE ART IN DIGITAL ENGINEERING.



AV. BARÃO HOMEM DE MELO, 4554 - 5th floor
ESTORIL, BELO HORIZONTE/MG

+55 31 2519-1001

dfmais.eng.br
comercial@dfmais.eng.br





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/



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 Tomar, 9, 6º.
1050-152 LISBOA
Tel.: (351) 217 925 000
Fax: (351) 213 537 492

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

ANGOLA
Praceta Farinha Leitão, edifício nº 27, 27-A - 2º Dto
Bairro do Maculusso, LUANDA
Tel./Fax: (244) 222 330 513
E-mail: geral.coba-angola@netcabo.co.ao

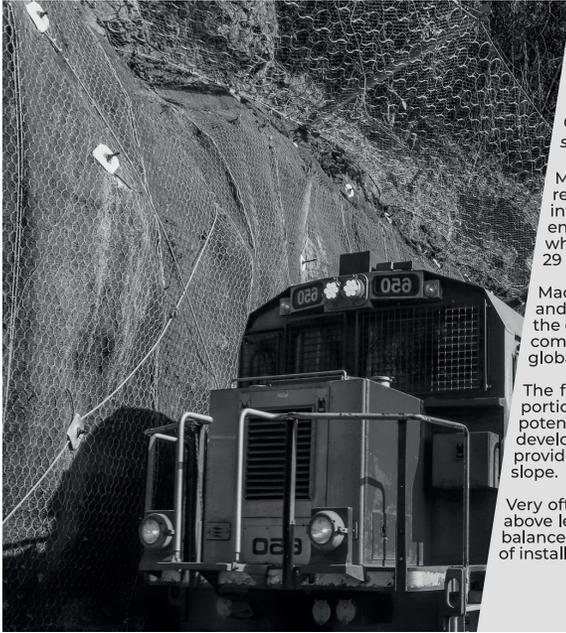
MOÇAMBIQUE
Centro de Escritórios. Pestana Rovuma Hotel.
Rua da Sé nº114, 4º Andar - 401 A, MAPUTO
Tel.: (258) 21 328 813
Fax: (258) 21 016 165
Tlm: (258) 820 047 454
E-mail: coba.mz@gmail.com

ARGÉLIA
09 Rue des Frères Hacine
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, 25º
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
LLI Business Center, Al Jazeera Stadium
PO Box 38360, Abu Dhabi - U.A.E.
Tel: (971) 2 495 0675
Fax: (971) 2 4454672



Maccaferri Rockfall barrier installed alongside mesh systems

Combining different systems to provide the most effective solution for rock faces and soil slopes.

Maccaferri RB Series of rockfall barriers is specifically designed to retain impacts of falling boulders, protecting people and infrastructure. Maccaferri rockfall barriers are available with energy absorption capacity starting from 35 kJ and up to 9,000 kJ, which is equivalent to the kinetic energy generated by a block of 29 tons falling at 90 km/h.

Maccaferri additionally developed numerous rockfall mitigation and erosion protection system to be implemented directly within the detachment zone. Among those, soil nailing is a technique that combines the use of steel anchors and facing systems to provide global and surficial stability to soil and weathered rocks.

The facing system plays a key role since it restrains the superficial portion of the slope which can mobilise between the anchors, potentially destabilizing the overall slope. Therefore, Maccaferri developed MacMat®, an innovative reinforced 3D geomat that provide surficial stabilization while promoting the revegetation of the slope.

Very often the use of combined solutions such as the two mentioned above leads to the best results. It also provides the most cost-effective balance between technical performance, risk, client value, ease/safety of installation and environmental benefits.



/maccaferri



/maccaferriatriz



@Maccaferri_BR



/MaccaferriWorld



/maccaferriworld

MACCAFERRI

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 Editorial**
Alexandre Pinto, Laura Caldeira
- 9 A durabilidade dos geossintéticos: estigma ou fator de sustentabilidade**
The durability of geosynthetics: stigma or sustainability factor
Maria da Graça Lopes, Madalena Barroso
- 21 Albufeiras na Ilha da Madeira: (imprescindível) impermeabilização com geossintéticos**
Water reservoirs on Madeira Island: (essential) waterproofing with geosynthetic
Madalena Barroso, Laura Caldeira, Pedro França Ferreira, Paulo França, Carlos Maligno
- 41 A Geotecnia na transição eco-digital das infraestruturas de transporte**
Geotechnics in the eco-digital transition of transport infrastructures
José Neves, João Moutinho, Ana Cristina Freire, André Paixão, Bernardo Monteiro, Manuel Parente, Nuno Cristelo, António Gomes Correia
- 79 A conquista do espaço subterrâneo**
The conquest of underground space
Raúl Sarra Pistone, João Gouveia, Nadir Plasencia, José Nuno Figueiredo, Gonçalo Diniz Vieira
- 103 Ensino e investigação da Geotecnia nas universidades em Portugal. Uma perspetiva sobre as últimas oito décadas**
Education and research in Geotechnics in Portuguese universities. A perspective over the last eight decades
Manuel Matos Fernandes
- 125 O projeto cápsula do tempo e a história da Geotecnia em Portugal**
Heritage time capsule project and Portuguese geotechnics history
José Mateus de Brito