



A IMPORTÂNCIA CRESCENTE DA ÁREA GEOAMBIENTAL EM OBRAS GEOTÉCNICAS: ACOMPANHAMENTO DE UMA OBRA EM LISBOA

ALÍCIA MARIANA NUNES RIBEIRO

Junho de 2025

**A IMPORTÂNCIA CRESCENTE DA ÁREA GEOAMBIENTAL EM
OBRAS GEOTÉCNICAS: ACOMPANHAMENTO DE UMA OBRA EM
LISBOA**

**THE GROWING IMPORTANCE OF THE GEOENVIRONMENTAL FIELD IN
GEOTECHNICAL WORKS: MONITORING WORK IN LISBON**

Alícia Mariana Nunes Ribeiro

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geotécnica e Geoambiente**

Orientador: Professor Helder I. Chaminé

Júri

Presidente

João Paulo Meixedo dos Santos Silva, Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Vogais

Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé, Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Maria Isabel Gonçalves Fernandes, Professora Auxiliar com Agregação, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Maria José Coxito Afonso, Professora Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Porto, junho de 2025

[página propositadamente em branco]

Dedicatória

Dedico esta dissertação a toda a minha família e ao meu companheiro, por terem sido essenciais nesta etapa da minha vida.

[página propositadamente em branco]

Resumo

A presente dissertação, baseada num estágio curricular académico, foca-se na crescente importância da componente geoambiental nas obras geotécnicas. Explora ainda uma campanha de prospeção geotécnica e ambiental, realizada na Rua do Mirador, em Lisboa. De modo a obter o conhecimento necessário para a elaboração do presente trabalho, foi realizado um estágio na Mota-Engil Engenharia & Construção S.A. – Departamento de Geotecnia. Neste relatório é dada ênfase aos trabalhos efetuados em campo, descrevendo alguns métodos de prospeção mais utilizados, incluindo a prospeção mecânica, ensaios *in situ* e prospeção geofísica. Também é referida a informação relevante a incluir nos ensaios geoambientais, como a legislação e os tipos de ensaios, assim como a sua importância no estudo geológico-geotécnico. É analisada em maior detalhe a crescente importância ambiental na geotecnia, com recurso ao estudo das campanhas de prospeção realizadas entre os anos de 2020 a 2024 através da plataforma “GIS MEEC”, da Mota-Engil. O objetivo desta análise é avaliar a tendência da solicitação de componente geoambiental em obras geotécnicas, principais elementos analisados e quais os que demonstram maior excedência em relação aos valores de referência utilizados pela APA, em Portugal. Por último, é analisado um caso prático de uma campanha de prospeção geotécnica e ambiental, que menciona os trabalhos realizados, a metodologia utilizada e os resultados obtidos. Debatem-se os resultados dos ensaios *in situ*, nomeadamente a resistividade elétrica e os ensaios geoambientais, visando prevenir possíveis consequências da deficiente aplicação e interpretação de resultados.

Palavras-chave: Geotecnia Ambiental, Prospeção Geotécnica, Ensaios, Contaminação, Admissibilidade

[página propositadamente em branco]

Abstract

This dissertation, based on an academic internship, focuses on the growing importance of the geoenvironmental component in geotechnical works. It also explores a geotechnical and geoenvironmental in situ investigation campaign carried out in Rua do Mirador, Lisbon. To acquire the necessary knowledge for this work, an internship was conducted at Mota-Engil Engenharia & Construção S.A. – Geotechnics Department. This report focuses on the work carried out in the field, describing some of the most commonly used prospecting methods, including mechanical prospecting, in situ tests, and geophysical exploration. It also provides relevant information to be included in environmental tests, such as applicable legislation and the types of tests, as well as their importance in geological-geotechnical studies. The growing geoenvironmental importance of geotechnics is analyzed in greater detail through a study of in situ investigation campaigns conducted between 2020 and 2024 using Mota-Engil's "GIS MEEC" platform. This analysis aims to assess the trend in requests for an environmental component in geotechnical works, the main elements analyzed, and those that show the most significant deviation from the reference values used by the APA in Portugal. Finally, a case study of a geotechnical and environmental in situ campaign is analyzed, mentioning the work carried out, the methodology used, and the results obtained. The results of in situ tests are discussed, particularly electrical resistivity and geoenvironmental tests, to prevent potential consequences resulting from the poor application and interpretation of the results.

Keywords: Environmental Geotechnics, In situ Investigations, Tests, Contamination, Admissibility

[página propositadamente em branco]

Agradecimentos

Agradeço à empresa Mota-Engil – Engenharia e Construção S.A. e ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) pela oportunidade de realização de um estágio curricular profissionalizante, que auxiliou como base para esta dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente.

Ao meu orientador do ISEP, Professor Helder I. Chaminé, e ao meu supervisor da Mota-Engil S.A., Engenheiro Geólogo João Branco, os meus sinceros agradecimentos pela confiança transmitida e constante acompanhamento e motivação ao longo da elaboração deste trabalho.

Ao orientador científico, Professor Helder I. Chaminé (DEG e LABCARGA|ISEP), por me ter confiado a sua orientação, pela partilha de bibliografia, acolhimento, paciência, críticas construtivas e exigência que tornaram a realização desta dissertação possível.

Ao supervisor do estágio, Engenheiro João Branco (Mota-Engil), pelo desafio proposto, pelo seu acompanhamento ao longo da realização deste trabalho, pelo interesse demonstrado e discussões, pelo espírito de ajuda, e pela disponibilização dos vários recursos que me permitiram desenvolver serenamente a dissertação.

Ao Departamento de Geotecnia da Mota-Engil (MEEC GEO) e, em especial, aos Engenheiros João Branco, Jorge Cruz, Beatriz Cruz, Daniela Cunha e à Doutora Liliana Freitas e todos os outros colaboradores da equipa por me acolherem, pelos conhecimentos transmitidos, pela disponibilidade e simpatia.

Agradeço também aos meus colegas do ISEP, pela amizade, motivação e pela ajuda ao longo do meu percurso académico.

A toda a minha família e amigos pela amizade e apoio, em especial, aos meus Pais, companheiro, e à minha prima pelo carinho, paciência, e motivação que me deram, incondicionalmente, ao longo destes anos. Vocês foram a base de toda a minha formação como pessoa, e tornaram-me naquilo que sou hoje.

A todos, um muito obrigado.

[página propositadamente em branco]

Índice

1. Introdução.....	3
1.1. Considerações Iniciais	3
1.2. Generalidades	4
1.2.1. Prospeção Geotécnica	4
1.2.2. Ambiente	5
1.3. Objetivos.....	7
1.4. Organização	8
2. Metodologias e Métodos	13
2.1. Prospeção Geotécnica	13
2.1.1. Considerações Gerais	13
2.1.2. Métodos Diretos.....	16
2.1.3. Métodos Indiretos.....	21
2.1.4. Ensaios Geotécnicos <i>in situ</i>	24
2.1.5. Instrumentação	29
2.2. Ensaios Geoambientais.....	30
2.2.1. O solo e a sua importância	30
2.2.2. Contaminação dos solos.....	31
2.2.3. Resíduos	36
2.2.4. Avaliação da admissibilidade em aterro para resíduos inertes.....	39
2.2.5. Avaliação da admissibilidade em aterro para resíduos não perigosos	41
2.2.6. Avaliação da admissibilidade em aterro para resíduos perigosos	42
2.2.7. Operações de remediação dos solos.....	43
3. Caso de Estudo I: Análise de várias Campanhas de Prospeção Geotécnica – A Importância Crescente da Componente Ambiental em obras geotécnicas	47
3.1. Considerações Iniciais	47
3.2. A importância ambiental nas obras geotécnicas.....	47
3.3. Plataforma GIS MEEC.....	48
3.4. Avaliação das campanhas de prospeção realizadas entre os anos de 2020 a 2024.....	49
3.5. Avaliação dos Ensaios Ambientais requisitados no ano de 2020	50
3.5.1. Enquadramento.....	50
3.5.2. Ensaios Ambientais Requisitados	52
3.5.3. Avaliação da Contaminação dos Solos	53
3.5.4. Avaliação de Perigosidade dos Solos.....	53
3.5.5. Avaliação da Admissibilidade dos Solos	53
3.6. Avaliação dos Ensaios Ambientais requisitados no ano de 2021	53
3.6.1. Enquadramento.....	53
3.6.2. Ensaios Ambientais Requisitados	55
3.6.3. Avaliação da Contaminação dos Solos	55
3.6.4. Avaliação da Perigosidade dos Solos.....	56
3.6.5. Avaliação da Admissibilidade em Aterros	56
3.7. Avaliação dos Ensaios Ambientais requisitados no ano de 2022	56
3.7.1. Enquadramento.....	56
3.7.2. Ensaios Ambientais Requisitados	57
3.7.3. Avaliação da Contaminação dos Solos	58
3.7.4. Avaliação da Perigosidade dos Solos.....	58
3.7.5. Avaliação da Admissibilidade em Aterros	58
3.8. Avaliação dos Ensaios Ambientais requisitados no ano de 2023	59

3.8.1.	Enquadramento	59
3.8.2.	Ensaaios Ambientais requisitados	60
3.8.3.	Avaliação da Contaminação dos Solos	61
3.8.4.	Avaliação da Perigosidade dos Solos	62
3.8.5.	Avaliação da Admissibilidade em Aterro	62
3.8.6.	Estudo Preliminar	62
3.9.	Avaliação dos Ensaaios Ambientais requisitados no ano de 2024	62
3.9.1.	Enquadramento	62
3.9.2.	Ensaaios Ambientais requisitados	63
3.9.3.	Avaliação da Contaminação dos Solos	64
3.9.4.	Avaliação da Perigosidade dos Solos	64
3.9.5.	Avaliação da Admissibilidade em Aterro	65
3.9.6.	Estudo Preliminar	65
3.10.	Breve análise e discussão dos resultados	65
4.	Caso de Estudo II: Estudo de uma Campanha de Prospeção Geológico-Geotécnica – Desde a	
	Execução em Campo às Análises Ambientais	71
4.1.	Considerações Iniciais	71
4.2.	Enquadramento	71
4.2.1.	Enquadramento Geográfico	71
4.2.2.	Enquadramento Geológico	72
4.2.3.	Hidrogeologia	73
4.3.	Prospeção Geológico-Geotécnica <i>in situ</i>	74
4.4.	Relatório Geotécnico	76
4.4.1.	Ensaaios SPT	79
4.4.2.	Ensaaios In Situ (Geofísica – Resistividade Elétrica)	80
4.4.3.	Resultados	87
4.4.4.	Ensaaios Laboratoriais	88
4.4.5.	Zonamento Geotécnico	90
4.5.	Relatório Geoambiental	91
4.5.1.	Plano de Investigação e de Amostragem de Solos	91
4.5.2.	Amostragem dos Solos	91
4.5.3.	Parâmetros Analisados (Solos)	93
4.5.4.	Investigação	93
4.6.	Breve Análise e Discussão dos Resultados	100
5.	Considerações Finais	105
5.1.	Perspetivas Futuras	107
6.	Referências Bibliográficas	111

Lista de figuras

Figura 1 – Esquema correspondente à organização da dissertação.....	9
Figura 2 – Metodologia dos Estudos Geológicos-Geotécnicos.....	14
Figura 3 – Exemplo de um poço (Retirado de: Pinho, 2024).	17
Figura 4 – Relação custo-benefício em campanhas de prospeção (Retirado de: Freitas, 1992).	18
Figura 5 – Esquema que apresenta os métodos indiretos (adaptado de Gonzalez & Ferrer, 2011; Matos Fernandes, 2021).	22
Figura 6 – Resistímetro SYSCAI Jr. Switch-48 da IRIS Instruments (Imagem: Mota-Engil).	23
Figura 7 – Ilustração do método da resistividade elétrica (Retirado de: Matos Fernandes, 2021).	24
Figura 8 – Características do equipamento do ensaio SPT (Retirado de: Arquivo Mota-Engil).	26
Figura 9 – Exemplo de utilização de um piezômetro (Retirado de: https://www.progeo.com.br/piezometro#group1-4).	30
Figura 10 – Fluxograma para seleção da tabela de Valores de Referência adequada (Retirado de APA, 2025).	35
Figura 11 – Características dos valores de referência para solos (Adaptado de APA, 2019).	36
Figura 12 – Avaliação da admissibilidade em aterro.	37
Figura 13 - Valores limites de lixiviação para a admissibilidade em aterros para resíduos inertes (Adaptado de: DL n.º 102-D/2020).	40
Figura 14 - Valores limite para o teor total de parâmetros orgânicos para a admissibilidade em aterros para resíduos inertes (Adaptado de: DL n.º 102-D/2020).	40
Figura 15 - Valores-limite de lixiviação para aterros de resíduos não perigosos, constados na Tabela n.º 4 do DL n.º 102-D/2020.	42
Figura 16 - Outros valores-limite para aterros de resíduos não perigosos, constados na Tabela n.º 5 do DL n.º 102-D/2020.	42
Figura 17 – Valores-limite de lixiviação para aterros de resíduos perigosos (Retirado de DL n.º 102-D/2020.)	43
Figura 18 - Outros valores-limite para aterros de resíduos perigosos (Retirado de DL n.º 102-D/2020.)	43
Figura 19 – Apresentação da página inicial do servidor GISMEEC (cortesia: Mota Engil).	48
Figura 20 – Visualização do pop-up que contém a tabela de atributos e os ficheiros de uma obra geotécnica.	49
Figura 21 – Gráfico referente à crescente procura na área da prospeção.	50
Figura 22 - Localização das obras geotécnicas realizadas no ano de 2020 (Retirado de: Plataforma GIS MEEC, Mota-Engil).	51
Figura 23 – Gráfico relativo às obras de prospeção ambiental realizadas em 2020.	51
Figura 24 – Localização das obras geotécnicas realizadas no ano de 2021 (Retirado de: Plataforma GIS MEEC, Mota-Engil).	54
Figura 25 – Gráfico relativo às obras realizadas em 2021.	54
Figura 26 – Localização das obras geotécnicas realizadas no ano de 2022 (Retirado de: Plataforma GIS MEEC, Mota-Engil).	56
Figura 27 – Gráfico relativo às obras realizadas em 2022.	57
Figura 28 - Localização das obras geotécnicas realizadas no ano de 2023 (Retirado de: Plataforma GIS MEEC, Mota-Engil).	59
Figura 29 – Gráfico relativo às obras realizadas em 2023.	60
Figura 30 – Gráfico referente às obras realizadas em 2024.	63
Figura 31 – Gráfico que representa o crescimento da inclusão de ensaios laboratoriais na prospeção ambiental.	66
Figura 32 – Gráfico que representa a diferença entre prospeções ambientais com solicitação de ensaios laboratoriais executados pela Mota-Engil entre 2020 e 2024.	66
Figura 33 – Gráfico que representa os tipos de ensaios ambientais mais requisitados.	67
Figura 34 – Gráfico que representa as maiores solicitações para os parâmetros analisados nos ensaios laboratoriais, entre os anos 2020 a 2024.	67
Figura 35 – Gráfico que representa os contaminantes que excederam os respetivos Valores de Referência.	68
Figura 36 – Localização geográfica do local em estudo (retirado de Google Earth, em 08/05/2025).	72

Figura 37 – Representação Geológica do local em estudo, extrato da folha 34-D (Lisboa) da Carta Geológica de Portugal (retirado de geoPortal do LNEG, em 08/05/2024).	73
Figura 38 – Carta de riscos hidrogeológicos do Regulamento Municipal de Urbanização e Edificação de Lisboa. (Retirado de: app_bm.download_mny_file).	74
Figura 39 – Aspeto de um dos equipamentos de furação utilizado (Mustang A-32 C) (A) e auto-grua em utilização (B) (Imagens: Cortesia Mota-Engil).	75
Figura 40 – Planta de localização da campanha de prospeção geológica-geotécnica complementar realizada pela Mota-Engil, Engenharia e Construção, S.A. – Geotecnia.....	76
Figura 41 – Exemplo das caixas referentes às amostras de uma sondagem (S1).	77
Figura 42 – Esquema representativo dos piezómetros instalados (arquivo Mota-Engil)	78
Figura 43 - Exemplo de um boletim de sondagem (log) realizado pela Mota-Engil, Engenharia e Construção, S.A. – Geotecnia (arquivo Mota-Engil).	79
Figura 44 – Resultados dos ensaios SPT com a profundidade.	80
Figura 45 – Localização dos perfis geoeletricos (arquivo Mota-Engil).	81
Figura 47 – Perfil de resistividade elétrica para o perfil P2. No topo: Modelo de resistividade aparente registada em campo; no centro: Modelo de resistividades aparentes calculadas; em baixo: Modelo de resistividade resultante da inversão (RMS: 10.3%).	82
Figura 46 - Perfil de resistividade elétrica para o perfil P1. No topo: Modelo de resistividade aparente registada em campo; no centro: Modelo de resistividades aparentes calculadas; em baixo: Modelo de resistividade resultante da inversão (RMS: 11.1%). (arquivo Mota-Engil).....	82
Figura 48 - Perfil de resistividade elétrica para o perfil P3. No topo: Modelo de resistividade aparente registada em campo; no centro: Modelo de resistividades aparentes calculadas; em baixo: Modelo de resistividade resultante da inversão (RMS: 7.3%). (arquivo Mota-Engil).....	83
Figura 49 - Perfil de resistividade elétrica para o perfil P4. No topo: Modelo de resistividade aparente registada em campo; no centro: Modelo de resistividades aparentes calculadas; em baixo: Modelo de resistividade resultante da inversão (RMS: 7.2%). (arquivo Mota-Engil).....	83
Figura 50 - Perfil de resistividade elétrica para o perfil P5. No topo: Modelo de resistividade aparente registada em campo; no centro: Modelo de resistividades aparentes calculadas; em baixo: Modelo de resistividade resultante da inversão (RMS: 8.0%). (arquivo Mota-Engil).....	84
Figura 51 – Resultado e interpretação dos dados do perfil P1. (arquivo Mota-Engil)	85
Figura 52 – Resultado e interpretação dos dados do perfil P2. (arquivo Mota-Engil).	85
Figura 53 – Resultado e interpretação da inversão dos dados do perfil P3. (arquivo Mota-Engil).....	86
Figura 54 – Resultado e interpretação da inversão dos dados do perfil P4. (arquivo Mota-Engil).....	86
Figura 55 – Resultados e interpretação da inversão dos dados do perfil P5. (arquivo Mota-Engil).	87
Figura 56 – Localização das anomalias identificadas na prospeção. (arquivo Mota-Engil).....	87
Figura 57 – Localização dos pontos de amostragem.	91
Figura 58 - Equipamento de furação, Dando Terrier (cortesia: Mota-Engil).....	92
Figura 59 - Exemplo de sondagens recolhidas em campo (arquivo: Mota Engil). Neste caso, podem ser observadas as sondagens SA1_010_070 (Recolhida entre os 10 e os 70 cm de profundidade); SA2_010_100 (Recolhida entre os 10 e os 100 cm de profundidade); SA2_100_200 (Recolhida entre os 100 e os 200 cm de profundidade).	92
Figura 60 – Polígonos de Thiessen, manchas de contaminação e volumes de solos contaminados para o Patamar A.....	98
Figura 61 - Polígonos de Thiessen, manchas de contaminação e respetivos volumes do Patamar B, com sondagem SA14.....	99
Figura 62 - Polígonos de Thiessen, manchas de contaminação e volumes de solos contaminados (UU) para o Patamar B, com exclusão da sondagem SA14.	99

Lista de tabelas

Tabela 1 – Objetivos do estudo geológico-geotécnico em função das fases do projeto (adaptado de Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011).....	5
Tabela 2 – Objetivos de cada fase de projeto e estudos geológico-geotécnicos a realizar (adaptado de Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011).....	15
Tabela 3 – Peças que constituem o equipamento de perfuração e as suas principais funções (adaptado de Coelho, 1996; Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011; Norbury, 2020).	19
Tabela 4 – Tipos de penetrómetros dinâmicos e as suas características (adaptado de Matos Fernandes, 2021).....	29
Tabela 5 - Valores de Referência (Adaptado de: APA, 2019, 2022a,b).	34
Tabela 6 – Propostas comerciais realizadas entre 2020 a 2024, para a empresa Mota-Engil Engenharia & Construção, S.A..	49
Tabela 7 – Parâmetros analisados em laboratório no ano 2020.....	52
Tabela 8 - Parâmetros analisados em laboratório no ano 2021.....	55
Tabela 9 - Parâmetros analisados em laboratório no ano 2022.....	58
Tabela 10 - Parâmetros analisados em laboratório no ano 2023.....	61
Tabela 11 – Parâmetros analisados em laboratório no ano 2024.	64
Tabela 12 – Resumo da campanha de sondagens.....	78
Tabela 13 – Parâmetros geométricos da aquisição de cada um dos perfis geoelétricos realizados (arquivo Mota-Engil).	81
Tabela 14 – Resumo dos valores adquiridos dos resultados laboratoriais em solos.	88
Tabela 15 – Resultados dos ensaios laboratoriais em rocha (arquivo Mota-Engil).	89
Tabela 16 – Elementos agressivos presentes nas amostras de água (arquivo Mota-Engil).	89
Tabela 17 – Índices de Langelier (IL) e Ryznar (IR). Os índices de Langelier e Ryznar são usados para avaliar a tendência de corrosão ou incrustação de água em sistemas de água potável e sistemas industriais (arquivo Mota-Engil).	89
Tabela 18 – Ensaio envolvidos na parametrização do zonamento geotécnico (arquivo Mota-Engil).	90
Tabela 19 – Plano analítico.....	93
Tabela 20 – Resumo dos dados obtidos para a contaminação (Arquivo: Mota-Engil).	95
Tabela 21 – Classes associadas à estimativa de volumes (dados: Arquivo Mota-Engil).	97
Tabela 22 – Resumo dos volumes e massas das diferentes tipologias de resíduos a produzir assumindo que todos os solos caracterizados sejam removidos do local (dados: Arquivo Mota-Engil).	100

[página propositadamente em branco]

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

APA	<i>Agência Portuguesa do Ambiente</i>
ARI	<i>Aterro para resíduo inerte</i>
ARNP	<i>Aterro para resíduo não perigoso</i>
ARP	<i>Aterro para resíduo perigoso</i>
COT	<i>Compostos Orgânicos Totais</i>
COV	<i>Compostos Orgânicos Voláteis</i>
DPSH	<i>Penetrómetro Dinâmico Superpesado</i>
EC7	<i>Eurocódigo 7</i>
GEE	<i>Gases de Efeitos de Estufa</i>
ISPT	<i>International Standard Penetration Test Results</i>
ISRM	<i>International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering</i>
LNEG	<i>Laboratório Nacional de Energia e Geologia</i>
LOQ	<i>Limites de Quantificação</i>
NP	<i>Norma Portuguesa</i>
NRGGR	<i>Novo Regime Geral de Gestão de Resíduos</i>
PAH	<i>Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos</i>
PCB	<i>Policlorobifenilos</i>
RCD	<i>Resíduos de construção e demolição</i>
RGGR	<i>Regime Geral da Gestão de Resíduos</i>
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
TPAH	<i>Hidróxido Tetrapropilamónio</i>
TPH	<i>Hidrocarbonetos totais de petróleo</i>
UA	<i>Uso Agrícola</i>
UC	<i>Uso Comercial/Industrial</i>
UU	<i>Uso Urbano</i>
VL	<i>Valores Limite</i>
VR	<i>Valores de Referência</i>

[página propositadamente em branco]

Capítulo I

Introdução

[página propositadamente em branco]

1. Introdução

1.1. Considerações Iniciais

O presente estudo insere-se na unidade curricular “Dissertação/Estágio/Projeto”, do 2º ano do Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente (MEGG), do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) – Politécnico do Porto (P.Porto). Esta dissertação foi realizada em formato de estágio curricular (cerca de 5 meses), fazendo parte de uma colaboração entre o ISEP, através do Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA)|DEG e a empresa Mota-Engil: Engenharia & Construção, S.A. – Geotecnia, que tem como finalidade o estudo da crescente importância da componente geoambiental em obras geotécnicas, comparando a evolução, ao longo dos anos, da solicitação de obras geotécnicas com componente ambiental. Posteriormente, irá ser analisado um caso de estudo da obra 17040-579 – Edifício na Rua do Mirador, em Lisboa, com especial foco na sua aplicação às várias infraestruturas geotécnicas e ambientais.

O Departamento de Geotecnia, situado em Canelas, Vila Nova de Gaia, caracteriza-se como um consórcio português que atua na construção e administração de infraestruturas nos setores da engenharia e construção, ambiente e serviços, concessões de transporte e energia. Esta empresa opera em mais de 30 países na Europa, África e América Latina, integrando mais de 280 firmas, tendo como objetivo manter um exigente modelo de gestão ética, social e ambientalmente responsável, com ações alinhadas com os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS)¹.

Nos próximos capítulos será realizada uma breve introdução à prospeção geotécnica e à importância geoambiental, componentes principais do tema da dissertação.

¹ + info: <https://ods.pt/>

1.2. Generalidades

1.2.1. Prospeção Geotécnica

Com o passar dos tempos, existe cada vez mais a necessidade do estudo e da análise dos terrenos para qualquer obra a ser realizada, visto que podem ocorrer diversos perigos e acidentes em grandes obras devido à falta das melhores e corretas metodologias e técnicas (e.g., *Bell, 2007; Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011; Matos Fernandes, 2021; Hencher, 2024*). Assim, é fundamental planejar e atuar de forma rigorosa e de acordo com as leis requeridas, de forma a determinar a resistência dos solos e as suas propriedades de deformação. Estes estudos são realizados antes, durante e após a obra, permitindo um controlo a longo prazo da situação da mesma (*Rodrigues, 2016*). O estudo irá incidir sobre a campanha de prospeção geotécnica, geofísica e ambiental, realizada pelo Departamento de Geotecnia da Mota-Engil, Engenharia & Construção, S.A, da obra 17040-579 Edifício na Rua do Mirador (Lisboa). Também serão analisados dados geotécnicos e geoambientais de obras realizadas em anos anteriores, de forma a evidenciar a crescente necessidade geoambiental na geotecnia.

No contexto da investigação geotécnica, são utilizadas várias metodologias, de forma a atingir os objetivos previamente indicados, abrangendo tanto ensaios realizados em campo (*in situ*) como análises laboratoriais. Neste primeiro passo, e de forma a tentar conhecer o terreno, também se poderá dar a aquisição de dados através de outros meios, tais como estudos geológicos, publicações técnicas, análise do terreno através de métodos SIG, fotografia aérea e ainda interpretação de cartas topográficas e geológicas existentes.

A Tabela 1 apresenta as várias fases que são desenroladas em etapas cronologicamente diferenciadas, permitindo programar as investigações “in situ” de forma a obter um crescente conjunto de dados geológicos de engenharia, geotécnicos e geoambientais (*Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011*).

Tabela 1 – Objetivos do estudo geológico-geotécnico em função das fases do projeto (adaptado de Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011).

Fases do Projeto	Objetivos Geológico-Geotécnicos
Estudos prévios	Viabilidade da obra
	Identificação dos riscos geológicos
	Condições geológico-geotécnicas gerais
Anteprojeto	Escolha do local e traçado
	Classificação geotécnica dos materiais
	Escolha dos métodos de prospeção geotécnica
Projeto	Zonamento geotécnico do maciço
	Parâmetros geotécnicos essenciais para o projeto de estruturas
	Campanha complementar de prospeção e ensaios
Construção	Controlo e implementação de um sistema de monitorização geotécnica
	Verificação e adaptação do projeto às dificuldades encontradas
Pós-Construção	Supervisão do comportamento do terreno e da edificação pós-obra

As campanhas de prospeção geotécnica podem ser realizadas utilizando métodos mecânicos e/ou geofísicos, podendo ainda ser classificados em métodos diretos ou indiretos (e.g., Clayton *et al.*, 1995; Coelho, 1996; Coduto, 1999; Bell, 2007; Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011; Norbury, 2020; Celada & Bieniawski, 2020; Matos Fernandes, 2021; Chaminé & Fernandes, 2023; Fernandes & Chaminé, 2023; Hencher, 2024).

Ao longo deste trabalho, irão ser abordadas as técnicas de prospeção mecânica (enquadradas nos métodos diretos), ensaios “*in situ*” e técnicas de prospeção geofísica (enquadradas nos métodos indiretos). Para o efeito recorreu-se, em boa parte, à bibliografia supracitada, além de outra que complementarará alguns dos aspetos descritos.

1.2.2. Ambiente

No contexto atual, o ambiente desempenha um papel fundamental para aprimorar a eficiência e a otimização de todas as fases envolvidas na análise e interpretação dos dados geotécnicos e laboratoriais. Assim, torna-se essencial adotar uma abordagem reflexiva, com o intuito de reunir todas as informações possíveis, que permitirão investigar os dados acumulados ao longo do tempo, identificando as suas falhas e explorando a capacidade de orientar decisões críticas no ramo da geotecnia.

Sob o ponto de vista ambiental, os solos são um recurso fundamental para o equilíbrio ecológico, sendo o mais vasto depósito terrestre de carbono. Este contribui, ainda, para regular as emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases com efeito de estufa. Nos últimos anos, tem ocorrido um crescimento de perda e degradação de solos. Apesar de este não ser um recurso renovável,

pode ser salvo através dos métodos de remediação de solos, sendo o método mais eficaz para os recuperar. Também é de elevada importância referir que os solos para uso urbano se encontram cada vez mais escassos e, por isso, a reabilitação das áreas contaminadas é uma necessidade cada vez mais urgente, visto que o contacto com os solos contaminados tem levado ao surgimento de problemas de saúde nas populações que vivem perto destes locais. Este é um problema de extrema importância, pois para além de afetar o meio ambiente e a saúde humana, também afeta as atividades económicas associadas ao uso do solo (*Cameselle & Reddy, 2009*). Assim, é de extrema importância realizar a avaliação dos solos, tomando as medidas necessárias de forma coerente e antecipada.

Existem quatro tipos de contaminação de solo, podendo estes ser:

- Efluentes Industriais: Descarga de águas residuais das indústrias, que contêm poluentes, incluindo compostos orgânicos e inorgânicos;
- Metais pesados: Resultantes de processos naturais ou atividades humanas (mineração, descarga de resíduos, queima de combustíveis fósseis, etc.), tais como o chumbo, mercúrio ou arsénio;
- Resíduos sólidos: Provenientes de atividades humanas, tais como a indústria, mineração e descarte impróprio de resíduos;
- Compostos orgânicos voláteis: Ocorrentes de atividades industriais e derrames de gasolina.

De forma a ser realizada a avaliação de solos, deverá ter-se em conta primeiramente o plano de amostragem e monitorização. Para avaliar a presença de contaminação de um solo, deverão ser considerados os elementos constantes no Guia Técnico da Agência Portuguesa do Ambiente – Plano de Amostragem e Plano de Monitorização do solo².

A Agência Portuguesa do Ambiente (APA) é a entidade portuguesa responsável pela implementação de políticas de ambiente, tendo como objetivo contribuir para um elevado nível de proteção e valorização do ambiente através da prestação de serviços de qualidade aos cidadãos.

O Plano de Amostragem do Solo tem como objetivo identificar e quantificar os contaminantes presentes no solo e na água com base em métodos analíticos. Este ainda pode ser utilizado numa fase de avaliação detalhada da qualidade do solo, permitindo otimizar a malha de amostragem (*APA, 2019, 2022a,b,c*).

² + info: <https://apambiente.pt/avaliacao-e-gestao-ambiental/guias-tecnicos-0>

Já o Plano de Monitorização do Solo permite obter informações que irão avaliar a evolução temporal e espacial da contaminação do solo, bem como os meios influenciados pela mesma (APA, 2019, 2022a,b).

Após a análise referente, recorre-se à comparação dos valores de referência, consultados no Guia Técnico da APA – Valores de Referência para Solo (APA, 2022b), para verificar se o solo é considerado contaminado. Caso haja contaminação do solo, recorre-se a métodos de descontaminação ou de remediação dos solos. O método mais utilizado atualmente é o método de escavação e aterro, por ser o mais simples, rápido e eficaz, evitando a necessidade de projetos adicionais. No entanto, é o método que contém mais impactos a nível ambiental, social e económico - emissões de GEE, ruído, exposição a contaminantes, taxas de aterro, etc.

Assim, e de forma a não causar impactos tão elevados como o método referido anteriormente, poderão ser utilizados outros métodos alternativos, sendo estes os Métodos Biológicos, Métodos Químicos ou Métodos Físicos. Os métodos biológicos utilizam organismos vivos, como bactérias e plantas, para degradar ou transformar contaminantes. Os métodos químicos utilizam reações químicas com o fim de destruir, mobilizar, fixar ou neutralizar contaminantes, utilizando posteriormente soluções aquosas ou solventes orgânicos para concentração e tratamento posterior. Por fim, os métodos físicos removem os contaminantes com recurso à escavação, ventilação do solo ou lavagem, separando o solo contaminado dos poluentes.

Caso seja realizada a reabilitação em locais contaminados, é necessário recorrer a vários estudos, entre os quais o estudo preliminar (EDD), estudo detalhado e AQR, plano de remediação, remediação e monitorização. O estudo preliminar irá identificar o problema e está relacionado com a compra do local, enquanto o estudo detalhado irá caracterizar o problema, adequando o projeto às características do local e cujo licenciamento do projeto no município deve ter em consideração a existência de contaminação. O plano de remediação oferecerá uma proposta de resolução do problema à parte da execução do projeto e, posteriormente a remediação irá resolver total ou parcialmente o problema. Por fim, a monitorização irá acompanhar a solução, levando ao fecho da operação.

1.3. Objetivos

O presente trabalho pretende realizar o estudo de uma campanha geotécnica com componente ambiental, de forma a demonstrar a importância da utilização de estudos ambientais na geotecnia e consequentes benefícios em todas as fases do seu processo. Tem também como objetivo analisar a crescente procura por campanhas geoambientais, face à preocupação crescente com o meio ambiente, e determinar a evolução destes pedidos, assim como o foco e resultados finais. A

presente dissertação permitiu aplicar os diversos conhecimentos obtidos ao longo do Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, em contexto de trabalho real.

Assim, destacam-se os seguintes tópicos como principais objetivos da presente dissertação:

- A caracterização pela análise dos ensaios geotécnicos mais utilizados nas diversas obras, de forma a ser possível obter uma avaliação em maior escala;
- Reforçar a importância dos estudos geoambientais realizados na geotecnia, realçando os ensaios mais utilizados na presente área e referentes legislações;
- Explorar várias obras de anos anteriores de forma a averiguar a crescente utilização de ensaios geoambientais na prospeção geotécnica;
- Aplicação de um caso prático de uma obra geotécnica com componente ambiental;
- Por fim, proporcionar uma perspetiva ampla e atual sobre o impacto ambiental na geotecnia, ressaltando as suas contribuições para a melhoria de precisão e sustentabilidade nos processos de investigação, análise e estudo do subsolo.

1.4. Organização

Esta dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

Capítulo I: Pretende-se contextualizar a dissertação, nomeadamente, salientar os vários ensaios aplicados na geotecnia, abordando ainda a importância dos ensaios geoambientais na área referida. Também é referenciada a legislação necessária para avaliação dos solos. Ainda serão descritos os principais objetivos, bem como a organização do trabalho.

Capítulo II: Será elaborada uma breve introdução teórica aos métodos e metodologias aplicadas no desenvolvimento do estudo, nomeadamente no plano de prospeção geotécnica e seguintes ensaios geoambientais;

Capítulo III: Inicia-se a abordagem ao caso de estudo através da análise de várias campanhas de prospeção onde serão averiguados dados relativos a ensaios geoambientais para investigar a possibilidade de contaminação dos solos; discutem-se os trabalhos realizados e verifica-se a demonstração da evolução histórica da presença de ensaios geoambientais na engenharia geotécnica;

Capítulo IV: É abordado um caso específico de uma campanha de prospeção, averiguando os ensaios realizados e discutindo os resultados obtidos;

Capítulo V: São expostas as conclusões finais, juntamente com possíveis direções futuras e sugestões para a integração de uma maior aplicação de ensaios geoambientais na prospeção geotécnica das várias empresas de engenharia e construção;

Capítulo VI: Segue-se as referências bibliográficas e, por fim, os anexos.

A Figura 1 ilustra esquematicamente a organização da presente dissertação.

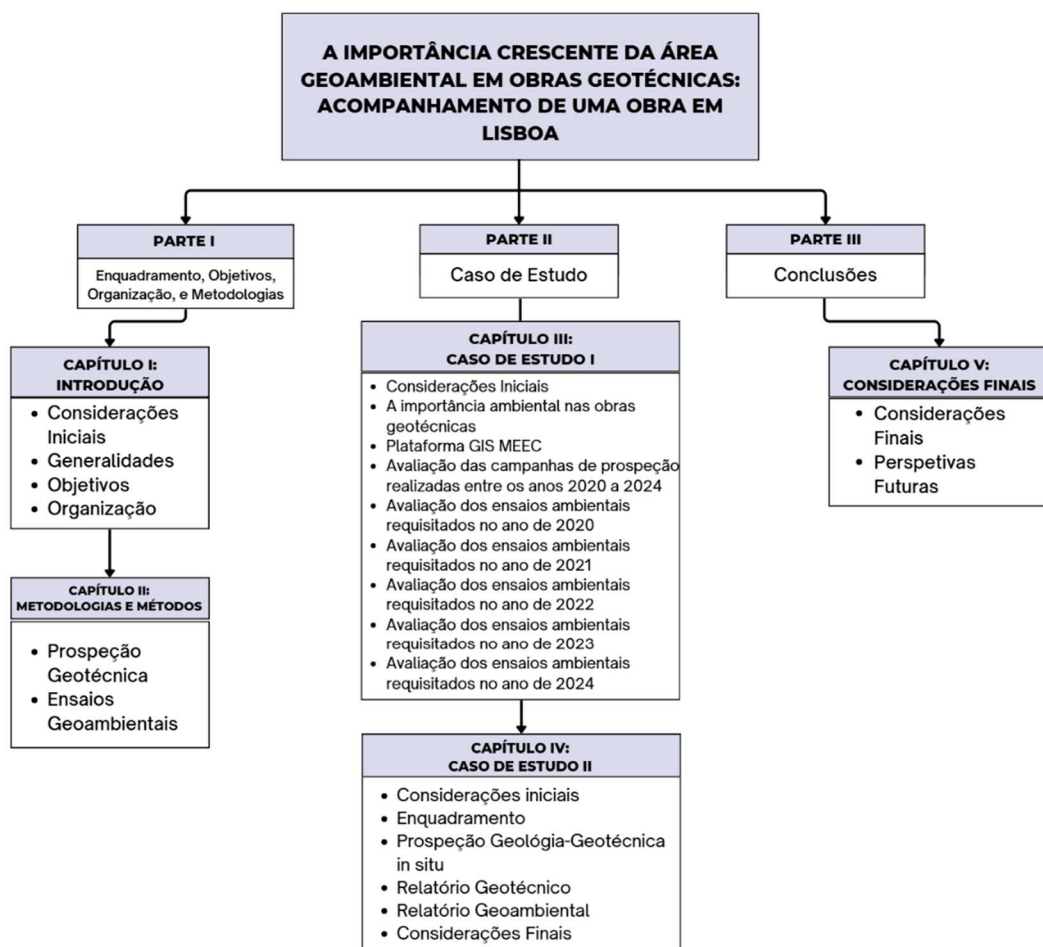


Figura 1 – Esquema correspondente à organização da dissertação.

[página propositadamente em branco]

Capítulo II

Metodologias e Métodos

[página propositadamente em branco]

2. Metodologias e Métodos

2.1. Prospeção Geotécnica

2.1.1. Considerações Gerais

A caracterização geotécnica de solos e rochas brandas deve ser conduzida por meio da combinação de métodos de investigação amplamente reconhecidos internacionalmente e seguindo as recomendações estabelecidas pela OE (*Ordem dos Engenheiros, 2020*). Todas as obras de engenharia dependem essencialmente do terreno onde se inserem, no qual se apoiam ou estabilizam. O conhecimento insuficiente das condições do solo é uma das principais causas para o insucesso das fundações. De acordo com *Hatheway et al. (2005)*, a caracterização do terreno é definida como a descrição de estudos de geologia de engenharia tridimensionais de superfície e subsuperfície do local pretendido para a construção de obras de engenharia, investigações geológico-geotécnicas, mitigação de riscos naturais, entre outros. Para se proceder a uma investigação adequada do terreno, é fundamental ter um vasto conhecimento acerca dos princípios geológicos e geotécnicos, bem como os métodos e técnicas aplicáveis a cada local (e.g., *Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011; Matos Fernandes, 2021; Chastre et al., 2023; Hencher, 2024*). Assim, a avaliação das condições dos solos irá permitir uma conceção segura, económica e rentável dos projetos envolventes. Nos estudos geológicos-geotécnicos, segue-se uma série de investigações de terreno e de laboratório, esquematizada na Figura 2 que, apesar de poder ser modificada devido a efeitos naturais e de complexidade do terreno, segue, em regra, a mesma linha de atuação.

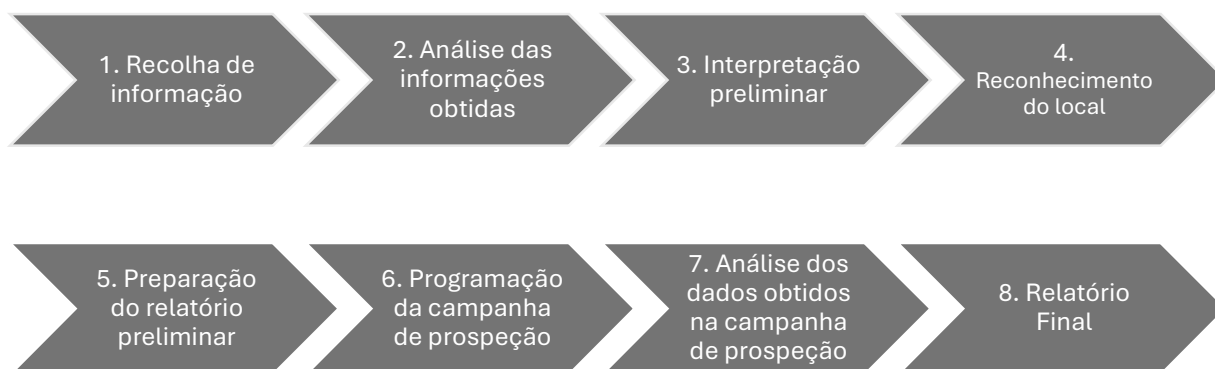


Figura 2 – Metodologia dos Estudos Geológicos-Geotécnicos.

Segundo *Clayton et al. (1995)*, a prospeção geológica e geotécnica é caracterizada pelo processo de operações realizadas no local, no qual se obtêm dados acerca das características do solo, rochas e outros fatores que possam influenciar a construção e o desempenho de uma estrutura ou projeto. Estas operações são aplicadas de acordo com o plano de prospeção, cujo conhecimento existente sobre o terreno e tipo e dimensões da obra a estudar depende do nível de detalhe do mesmo. No plano, são incluídos os critérios de colheita de amostras, a realização de ensaios *in situ* (tipo e quantidade) e ainda a localização dos diversos métodos de prospeção (*Farinho, 2021*).

Tal como referido anteriormente, os métodos de prospeção geotécnica podem ser classificados como métodos diretos e indiretos. Os ensaios realizados em campo, *in situ*, também se encontram associados à fase do projeto em análise. Na Tabela 2, encontram-se referenciados os trabalhos a desenvolver de acordo com a fase do projeto.

Nos subtópicos a recorrer posteriormente, irão ser apresentadas algumas considerações das técnicas de prospeção geotécnica utilizadas nas campanhas em questão. Poderão ser consultadas, de uma forma mais pormenorizada, as técnicas e metodologias utilizadas neste relatório, bem como outras que não serão ilustradas no mesmo como, por exemplo, em *Coelho (1996)*, *Coduto (1999)*, *Gonzalez de Vallejo & Ferrer (2011)*, *Norbury (2020)*, *Matos Fernandes (2017, 2021)*, *Fernandes & Chaminé (2023)* e *Hencher (2024)*.

No caso de estudo, a campanha de prospeção consistiu na realização de sondagens geoambientais e geotécnicas, ensaios geofísicos e ensaios laboratoriais.

Tabela 2 – Objetivos de cada fase de projeto e estudos geológico-geotécnicos a realizar (adaptado de Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011).

Fases do Projeto	Principais Atividades	Trabalhos de investigação geológica-geotécnica
Estudo Prévio e de Viabilidade	Pesquisa de informação	Topografia e relevo. Hidrologia e hidrogeologia. Mapas geológicos regionais. História geológica. Sismicidade e outros riscos geológicos.
	Fotointerpretação	Fotografia aérea e teledeteção. Geomorfologia. Litologias e estruturas. Riscos geológicos.
	Reconhecimento prévio de campo	Identificação de solos e rochas. Elementos estruturais. Dados hidrogeológicos e de drenagem. Geomorfologia, estabilidade de vertentes, desabamentos, subsidência, inundações, etc. Problemas goambientais. Acessos e condições para o estudo do terreno.
Anteprojeto	Cartografia geológica - geotécnica (escalas 1:5000-1:10000)	Litoestratigrafia e estrutura geológica. Geomorfologia e hidrogeologia. Classificação e propriedades dos terrenos.
	Dados hidrológicos-hidrogeológicos	Identificação de bacias de inundação, vales aluvionares e zonas cársticas.
	Estudos geotécnicos simples	Prospecção ligeira e sondagens geotécnicas. Prospecção geofísica. Ensaio de laboratório.
Projeto	Estudos geotécnicos detalhados	Prospecção ligeira e sondagens geotécnicas. Prospecção geofísica. Ensaio in situ e em laboratório.
	Cartografia geotécnica de detalhe (1:500-1:2000)	Mapas geológicos-geotécnicos detalhados. Zonamento do maciço.
Construção	Acompanhamento geotécnico	Planeamento geotécnico da obra. Verificação dos parâmetros geotécnicos. Fundação das estruturas. Estabilidade da escavação, superficial ou subterrânea.
	Instrumentação	Instalação e leitura de instrumentação. Controlo de qualidade.
Pós-Construção	Monitorização	Acompanhamento do projeto.

A prospeção geotécnica rege-se, também, segundo os designados Eurocódigos (*OE-Ordem dos Engenheiros, 2020*). Os Eurocódigos Estruturais constituem um conjunto de 10 Normas Europeias (EN) para o projeto de estruturas de edifícios e de outras obras de engenharia realizadas com diferentes materiais, com o objetivo de unificar critérios e normativas de cálculo e dimensionamento. De forma a realizar um estudo geotécnico pormenorizado, é necessário recorrer

ao Eurocódigo 7, relativo a projetos geotécnicos e ensaios. O Eurocódigo 7 é constituído por duas partes distintas, sendo estas a primeira parte (EN 1997-1 2004), que se encontra relacionada com as regras gerais do dimensionamento geotécnico, retratando os seus princípios gerais e os requisitos que garantem a segurança, utilização e durabilidade das estruturas suportadas e a segunda parte (EN 1997-2 2007), que diz respeito à prospeção geotécnica e aos ensaios de campo e laboratoriais.

2.1.2. Métodos Diretos

De forma a definir o número de sondagens a efetuar ou a profundidade que estas deverão atingir, é necessário realizar um estudo preliminar do terreno, e obter informações através de anteriores trabalhos de prospeção realizados nas proximidades.

Os métodos diretos de investigação geotécnica permitem o reconhecimento, acesso e observação direta dos terrenos *in situ* com recurso a equipamentos de escavação manuais ou mecânicos ligeiros. Estes também permitem caracterizar a estrutura dos maciços rochosos e determinar as propriedades mecânicas do material rochoso ou terroso (*Alminhas, 2022*). Os três principais métodos de prospeção direta são os poços, valas/trincheiras e galerias que, apesar de não se terem encontrado presentes na campanha de prospeção estudada ao longo da dissertação, são importantes na geotecnia (*Matos Fernandes, 2021; Fernandes & Chaminé, 2023*).

a) Poços

Quando se pretende interetar algum tipo de estrutura/infraestrutura em solos ou aterros de baixa profundidade, recorre-se a poços. Este método é executado através da escavação em segurança até um máximo de 3 a 4 m, podendo ser executados com recurso a retroescavadoras ou, com menos frequência, de forma manual, utilizando enxadas, pás e picaretas. Os poços apresentam, habitualmente, secção quadrada ou retangular, com dimensões variáveis de acordo com o braço e balde da retroescavadora.

A maior vantagem deste método de prospeção passa por permitir a observação direta do terreno, possibilitando a análise das variações que ocorrem ao longo do substrato, pela colheita de grandes quantidades de amostras remexidas e pela possibilidade de realizar ensaios *in situ* sobre os terrenos (*Farinho, 2021*).

De acordo com *Lourenço (2020)*, os poços utilizados na geotecnia podem ser classificados como poços de inspeção ou poços de prospeção, cuja diferença se baseia na sua finalidade. Os poços de inspeção permitem avaliar as fundações de pilares e paredes dos edifícios, estruturas enterradas

casuais, para além dos materiais que estes intersectam. Já os poços de prospeção possibilitam a caracterização dos solos in situ nos locais investigados para uma obra de engenharia.

Dependendo da geometria da escavação e do tipo de solo, poderá ser necessário proceder à entivação do poço, de modo a evitar a queda de material das paredes. Também é necessário ter em consideração o nível freático, visto que os riscos de movimentos de massas ou colapsos dos terrenos são uma preocupação significativa.

A Figura 3 apresenta um poço.



Figura 3 – Exemplo de um poço (Retirado de: Pinho, 2024).

b) Valas/Trincheiras

Com uma finalidade bastante semelhante à dos poços, as valas/trincheiras correspondem a escavações superficiais de desenvolvimento linear, sendo utilizadas principalmente em locais amplos com espessura de material de recobrimento reduzida (*Alminhas, 2022*).

No que diz respeito à sua abertura, esses tipos de escavações podem ser feitos tanto por meios manuais como meios mecânicos como, por exemplo, a utilização de abre-valas, martelo pneumático ou ainda uma retroescavadora. Estes tipos de métodos ainda são imensamente utilizados em locais de barragem e canais, sendo que a profundidade da vala não tende a passar dos 2 m de profundidade, podendo chegar no máximo a 6 m. Poder-se-á proceder à entivação da vala, quando esta ultrapassar os 1,80 m de profundidade ou caso o solo seja pouco coerente.

c) Galerias

As galerias de prospeção são caracterizadas como um método direto que permite a realização do estudo do maciço in situ e a colheita de amostras com uma área de seção reduzida e um desenvolvimento longitudinal. As galerias podem ser obtidas pela ação de meios mecânicos de elevada potência ou de explosivos, sendo que a escolha do método está relacionada com as condições do terreno. Estas podem ser efetuadas em qualquer tipo de maciço, sendo que para os mais brandos é necessário recorrer ao revestimento da galeria sempre que necessário (*Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011*). São principalmente usadas em locais amplos com reduzida espessura de material de recobrimento. As galerias nem sempre entram no plano de prospeção por terem um elevado custo económico. Isto faz com que a escolha da utilização deste método deverá basear-se numa escolha ponderada e que permita fazer a melhor análise possível em relação à razão custo-benefício (*Freitas, 1992*). A Figura 4 apresenta a relação custo-benefício em campanhas de prospeção.

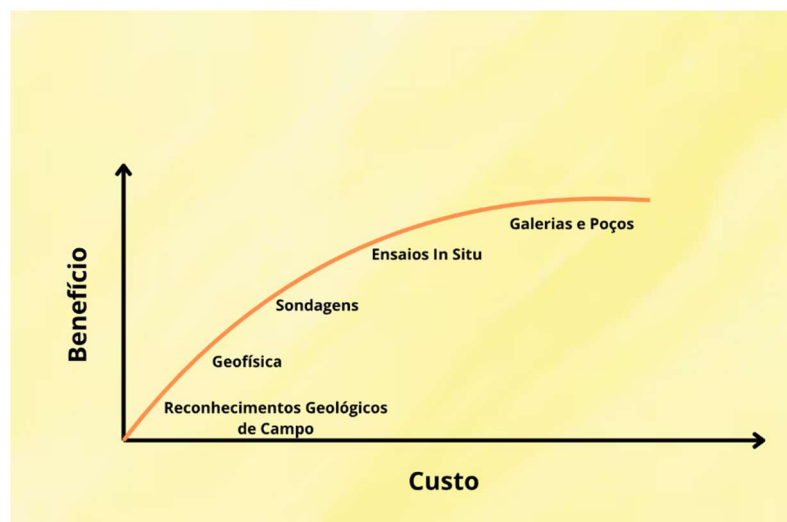


Figura 4 – Relação custo-benefício em campanhas de prospeção (Retirado de: Freitas, 1992).

d) Sondagens

As sondagens são uma operação de prospeção semidireta do subsolo e consistem na abertura de furos de pequeno diâmetro executados, normalmente, a partir da superfície ou em poços de fiscalização/inspeção de pequena profundidade. A utilização destes ensaios em profundidade permite fornecer informações relativamente à estratigrafia do subsolo, ou seja, a disposição e natureza das camadas do solo e rocha. Isto permite aos profissionais entenderem como é que as condições do subsolo podem afetar a estabilidade e o desempenho de estruturas, como fundações, edifícios, pontes, túneis, entre outros. Assim, com base nos dados obtidos nas sondagens, os

profissionais podem tomar decisões fundamentadas sobre o projeto, como o tipo de fundação mais adequado, a necessidade de medidas de estabilização do terreno e a escolha de materiais de construção mais apropriados às condições do solo. Estes ainda permitem a recolha de amostras que possibilitam a realização de ensaios laboratoriais e ensaios *in situ*. Alguns fatores permitem a definição da profundidade máxima e do método de perfuração, tais como o tipo e dimensão da obra, características do maciço, equipamento e acessibilidade do terreno (Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011).

Sondagens à percussão

As sondagens à percussão são um dos métodos mais antigos e são utilizadas tanto em solos granulares como em solos coesivos, podendo alcançar profundidades de 30 m a 40 m, sendo mais frequente alcançar profundidades entre 15 e 20 m. Como são sondagens destrutivas, as amostras são remexidas. Também necessitam de revestimento frequente, principalmente em terrenos incoerentes.

Os instrumentos utilizados neste tipo de sondagem são o trépano e a limpadeira. O trépano rompe o terreno com recurso à percussão sistemática, esmagando os fragmentos e mistura os detritos com água e avança mantendo-se com um diâmetro mais ou menos constante. Já a limpadeira faz a remoção da mistura originada pelos detritos de forma a permitir o avanço do trépano. A percussão pode ser com cabo, varas cheias, varas ocas e tubo e sapatas.

Sondagens à rotação

As sondagens à rotação são um método de investigação geológica e geotécnica que fornece informações de permeabilidade e nível da água subterrânea, podendo perfurar o subsolo a profundidades variáveis e com inclinações distintas, ainda que alguns materiais geológicos possam apresentar maiores dificuldades. O equipamento de perfuração é constituído por uma coroa, por um centralizador e um calibrador, um tubo de revestimento exterior e interior, uma mola e a coroa de corte. Na Tabela 3 são apresentadas as peças que constituem o equipamento de perfuração e consequentes funções de cada um.

Tabela 3 – Peças que constituem o equipamento de perfuração e as suas principais funções (adaptado de Coelho, 1996; Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011; Norbury, 2020).

Equipamento	Função
Cabeça	Liga o caroteador às varas;
Centralizador	Mantém a forma das paredes do furo e garante a estabilidade da coluna de furação;
Calibrador	Porta amostra;
Tubo de revestimento exterior e interior	Impede a queda da amostra no amostrador;
Mola	Constituída por carboneto de tungsténio ou por diamante;
Coroa de corte	

Neste tipo de sondagem, é realizado um furo através de uma ação rotativa combinada com uma força descendente, de forma a desgastar o material que se encontra no fundo do furo. É utilizado um fluido de perfuração, que é normalmente água, lama ou espuma e é bombeado para a broca através das hastes de perfuração ocas, com o objetivo de:

- Lubrificar e arrefecer a broca;
- Limpar o furo através do transporte dos detritos de perfuração para a superfície;
- Estabilizar o furo;
- Fornecer pressão hidrostática.

Para solos cujas paredes do furo tendem a colapsar, é utilizada uma solução aquosa de bentonite (Chastre et al., 2023).

A amostra é recolhida em amostradores especiais de tubo simples ou de tubo duplo, podendo ainda ser de tubo triplo, onde é efetuada uma amostragem contínua dos terrenos atravessados. No tubo simples, o fluido de perfuração lava toda a superfície do testemunho. A maioria das perfurações é realizada segundo sistemas de duplo tubo, cujo tubo externo gira em torno de um interno que recolhe o material. Já o tubo triplo ajuda na redução das dificuldades presentes quando se utiliza o tubo duplo (i.e., o fluido circula entre o material e o tubo amostrador, podendo transportar parte do material desgastado). Neste mesmo sistema, o material entra num tubo interno à parte, que não gira, sendo que o fluido circula entre o tubo interno e um tubo externo sem tocar na amostra.

Normalmente, quanto maior o diâmetro do tubo, melhor a recuperação e a qualidade da amostra, sendo prudente começar por utilizar um maior diâmetro e reduzir o mesmo conforme necessário de acordo com a profundidade.

Na realização de sondagens de maior profundidade, onde é necessário um maior rendimento, é utilizada a metodologia *Wire-Line*, o que permite a realização de amostragens no interior das varas, não sendo necessário retirar o trem de varas para recolher a amostra.

Roto-Percussão

O método de roto-percussão é uma técnica de perfuração destrutiva, utilizada quando é dispensável um estudo do material constituinte do subsolo e tem como objetivo um elevado rendimento na perfuração dos maciços rochosos em estudo. Para tal, são utilizados outros tipos de 'bits', tais como as trialetas, os martelos e os tricone 'roller bits', entre outros (Sandvik-Tamrock, 1999; Galiza et al., 2011; Ramos, 2022).

À medida que são realizadas as sondagens, a perfuração é obtida através de um martelo de perfuração (fundo de furo) utilizando ar comprimido que desce pelo interior das varas e um bit que efetua rotação convencional, através da unidade de rotação do equipamento. Em conjunto, estes fraturam o terreno por trituração e pancadas simultâneas, decompondo o material uniformemente. Neste método, o ar comprimido é o fluído responsável pela percussão, bem como pela limpeza do furo e arrefecimento do bit e faz com que os detritos sejam expulsos para a superfície (*Sandvik-Tamrock, 1999*).

2.1.3. Métodos Indiretos

A geofísica é uma técnica da prospeção geotécnica que envolve vários métodos indiretos e que permitem caracterizar as propriedades físicas dos materiais, nomeadamente dos solos e das rochas. Estes métodos complementam as investigações *in situ* e os métodos diretos de investigação, de forma não destrutiva, tendo uma utilização crescente na área da geotecnia (e.g., *Gonzalez & Ferrer, 2011; Matos Fernandes, 2021*). Estes ainda poderão otimizar a necessidade de realização de furos, de forma a economizar.

Este tipo de método pode ser utilizado para:

- Determinar a espessura de depósitos superficiais;
- Contribuir na definição dos perfis geológico-geotécnicos do subsolo;
- Avaliar a profundidade do substrato rochoso;
- Detetar artefactos, vazios e cavidades.

Os ensaios geofísicos são essencialmente utilizados para identificação de níveis freáticos, avaliação da espessura dos solos de cobertura, previsão das condições de escavabilidade dos terrenos, identificação de cavidades e determinação das características elástico-dinâmicas dos terrenos (*OE-Ordem dos Engenheiros, 2020*).

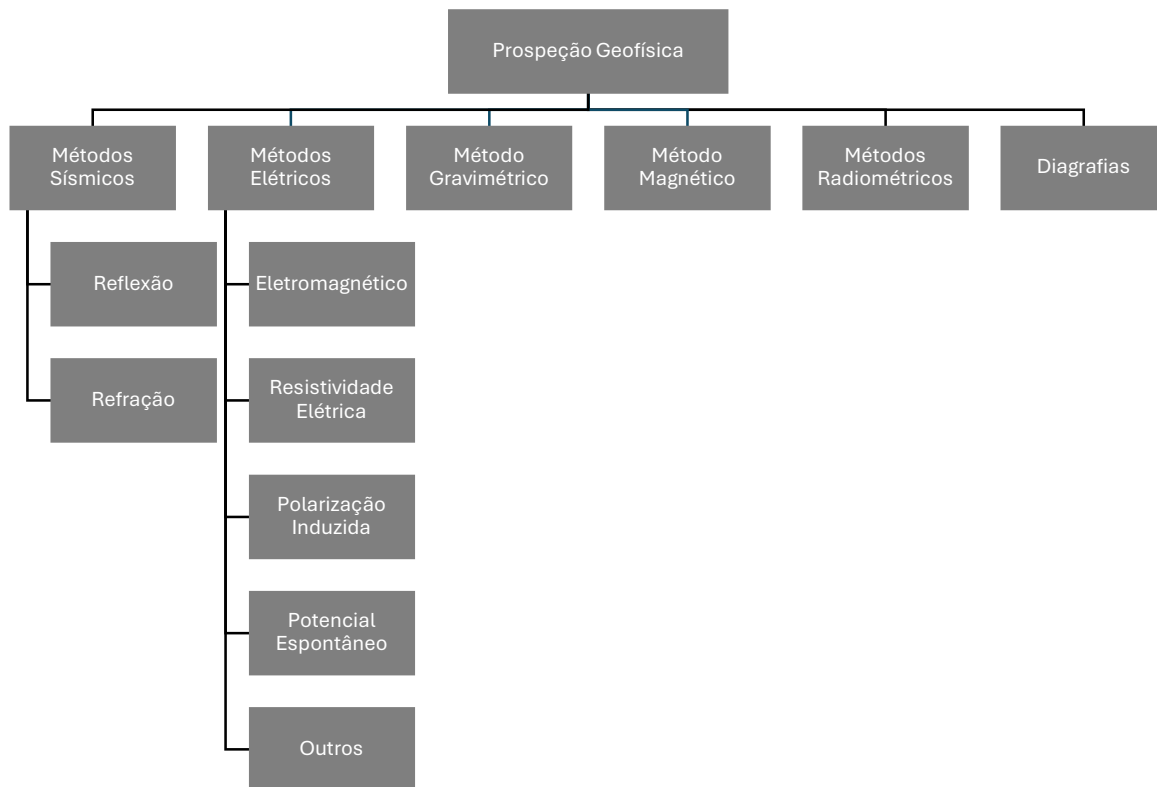


Figura 5 – Esquema que apresenta os métodos indiretos (adaptado de Gonzalez & Ferrer, 2011; Matos Fernandes, 2021).

a) Métodos Elétricos

A prospeção geofísica tem vindo a ser utilizada de uma forma crescente, visto que é constituída por métodos de natureza não invasiva (Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011). Esta tem sido mais empregue nas áreas de geotecnia, do ambiente e da arqueologia.

Resistividade Elétrica

Na prospeção geofísica, os métodos elétricos baseiam-se nas propriedades elétricas das rochas e dos solos tal como, por exemplo, a condutividade e a resistividade e, por isso, são adequados para ajudar a delimitação de plumas de contaminação do subsolo.

Estes métodos consistem na aplicação de uma energia no terreno, de forma a criar campos artificiais, cuja resposta, através das suas variações, permite deduzir as características geológicas ou minerais do subsolo. No campo da geotecnia, é utilizado um perfil longitudinal ou tomografia.

A sua utilização baseia-se no uso de um resistímetro e de quatro eléctrodos, dois de corrente e dois de potencial. O parâmetro físico a determinar é a resistividade elétrica, dependendo da litologia, estrutura interna e da quantidade de água no meio.

A seguinte Figura 6 apresenta um tipo de resistímetro.



Figura 6 – Resistivímetro SYSCAI Jr. Switch-48 da IRIS Instruments (Imagem: Mota-Engil).

Num solo estratificado, esta propriedade varia em profundidade, conforme a litologia e a microestrutura, sendo também muito sensível ao teor de água. No método de resistividade elétrica, é injetada corrente elétrica através de um par de elétrodos (A e B – elétrodos de corrente), sendo posteriormente medida a diferença de potencial proveniente entre outro par de elétrodos (M e N – elétrodos de potencial). Conhecendo a intensidade da corrente, a diferença de potencial e as distâncias que separam os elétrodos de corrente dos de potencial, é possível calcular a resistividade do meio. Alternando a configuração dos elétrodos é possível obter várias possibilidades de estudo.

Com base na Lei de Ohm, é calculada a resistividade do terreno pelas distâncias entre os elétrodos, da corrente aplicada e diferença de potencial medida.

A tomografia elétrica clássica 2D consiste na medição da resistividade ao longo de um perfil (ou linha), na qual as medições são efetuadas segundo as configurações específicas, tais como *Wenner*, *Schlumberger*, dipolo-dipolo, entre outras.

A seguinte Figura 7 apresenta o método de Schlumberger, com um par (AB) de elétrodos correntes e um par (MN) de potenciais elétrodos.

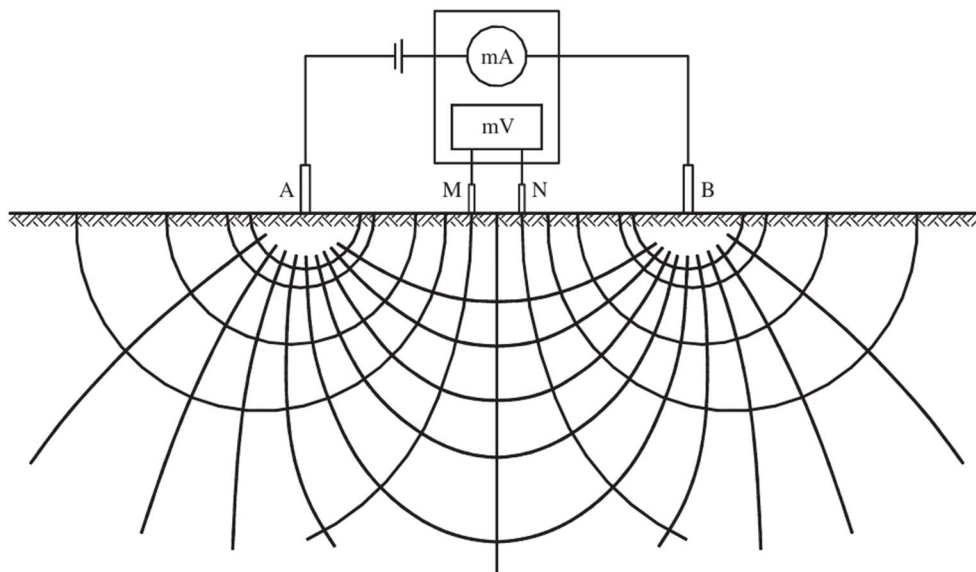


Figura 7 – Ilustração do método da resistividade elétrica (Retirado de: Matos Fernandes, 2021).

- O dispositivo de *Wenner* utiliza uma configuração com espaçamentos iguais entre 4 eletrodos dispostos em linha reta na superfície. A corrente alternada circula pelos dois eletrodos exteriores, enquanto a diferença de potencial é medida entre os eletrodos interiores.
- No dispositivo de *Schlumberger*, o seu modo de funcionamento é idêntico ao dispositivo de *Wenner*. A sua diferença encontra-se na distância entre eletrodos, cuja separação entre os dois interiores deverá ser inferior a um quinto da distância entre os eletrodos exteriores.
- Já no método dipolo-dipolo, a variação dá-se apenas nas distâncias entre os dois conjuntos de eletrodos ao longo da linha de aquisição, sendo que a distância entre os eletrodos de potencial é a mesma.

2.1.4. Ensaios Geotécnicos *in situ*

Os ensaios *in situ* são utilizados, na maioria das vezes, na prospeção geotécnica e são extremamente importantes para o conhecimento geotécnico dos maciços e realização do zonamento geotécnico do terreno (e.g., Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011; Matos Fernandes, 2021; Chaminé & Fernandes, 2023; Fernandes & Chaminé, 2023). Têm como objetivo a caracterização das propriedades do solo que são necessárias para o dimensionamento de estruturas geotécnicas e constituem um conjunto de técnicas variadas e independentes. Estes ensaios são realizados nas condições naturais dos terrenos e, visto que envolvem um maior volume do terreno, permitem solicitar o terreno na sua situação real (Farinho, 2021). Estes podem ser:

- Ensaios de Resistência;
- Ensaios de Deformabilidade;
- Ensaios de Permeabilidade;
- Ensaios Penetrométricos

Alguns destes ensaios *in situ* são: os ensaios de penetração dinâmica (DPL, DPH e DPSH), ensaios de penetração estática CPTU (*Piezo Cone Penetration Test*) e o ensaio de Molinete (*Vane Test*) (Lourenço, 2020).

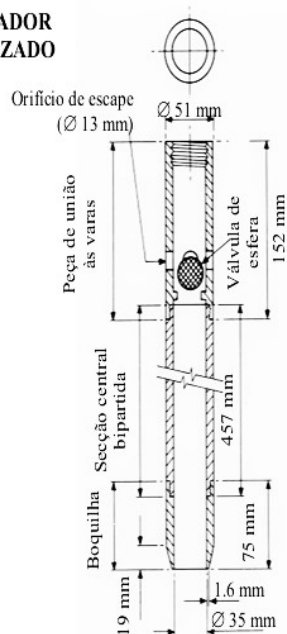
Assim, o tipo de ensaio a realizar irá depender do que for o mais adequado para cada situação, utilizando o mínimo de recursos possível e de modo a aumentar a obtenção de informação. Neste capítulo serão abordados os ensaios *in situ* utilizados nas campanhas de prospeção em estudo.

a) SPT – Standard Penetration Test

Os ensaios SPT são um ensaio de penetração dinâmica *in situ* que foram sendo aprimorados ao longo do século XX por vários especialistas como Karl von Terzaghi, Harry Mohr, Ralph Peck e Artur Casagrande (detalhes em *Terzaghi et al., 1996*), tendo sido padronizados pela norma ASTM D1586 desde 1958 (*Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011; Alminhas, 2022*).

Estes são realizados no interior de furos de sondagem aquando da perfuração, podendo ser executados em quase todos os solos (à exceção dos solos grosseiros) devido à sua diversidade e versatilidade e são os ensaios mais utilizados na prospeção geotécnica de solos. O objetivo principal deste tipo de ensaio é a obtenção de índices de resistência à penetração do solo de um amostrador padronizado. Os resultados poderão ser mais ou menos precisos em função do tipo de solo. Por exemplo, em areias, os resultados são muito precisos, mas, no entanto, é necessária atenção ao aplicar este ensaio em argilas e siltes, ou até mesmo quando este se aplica em areias abaixo do nível freático, visto que a resistência à penetração irá variar de acordo com a saturação do solo (*Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011; Alminhas, 2022*). A Figura 8 apresenta algumas das características dos ensaios SPT.

AMOSTRADOR NORMALIZADO



DISPOSITIVO DE ENSAIO

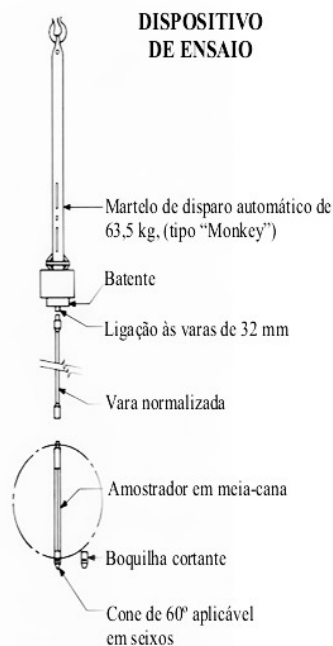


Figura 8 – Características do equipamento do ensaio SPT (Retirado de: Arquivo Mota-Engil).

A frequência habitual da utilização deste ensaio é a cada 1,5 a 5 m, em função das características do terreno.

De acordo com a norma ISO 22476-3, o ensaio SPT consta da cravação de um amostrador tubular que contém duas meias canas e um cone de perfuração aberto (com diâmetro exterior de 51 mm e diâmetro interior de 38,1 mm na meia cana e de 34,9 mm na ponteira cônica), recorrendo a um equipamento de percussão de massa não superior a 115 kg, constituído por um martelo de aço com massa normalizada de 63,5 kg (+/- 0,5 kg), que é içado de forma a obter uma altura de queda livre de 760 mm (+/- 10 mm).

Assim, o ensaio é realizado de forma descontínua a cada 1,5 m a 5 m de profundidade ao longo da execução de um furo de sondagem, utilizando o amostrador no solo por golpes produzidos pela queda do martelo. Na profundidade definida para o ensaio, o amostrador tubular é acionado em três fases de 150 mm de comprimento de penetração, onde irá ser registado o número de golpes necessário para cada 150 mm. Este também poderá ser faseado sempre que ocorre a mudança de litologia. Para os resultados do ensaio são consideradas a segunda e a terceira etapas para ultrapassar o volume de solo distribuído pelas operações de perfuração. A soma dos golpes (N) corresponde à resistência à penetração. No final de cada ensaio, é recolhida uma pequena amostra

de solo, que é armazenada num recipiente à parte, permitindo a posterior análise para definição da estratigrafia do terreno ou análise laboratorial.

O ensaio é dado como terminado quando o número de pancadas para atingir a penetração pretendida é superior a um valor estabelecido, designado por “nega”, anotando-se sempre a penetração alcançada. As condições da conclusão do ensaio irão variar de acordo com os países e normas utilizadas. De acordo com a norma ASTM D1586-11, dá-se a condição de “nega” quando:

- São necessárias mais de 50 pancadas para qualquer das secções de 150 mm;
- São necessárias 100 pancadas para os 300 mm;
- Quando não se observa penetração no solo após 10 pancadas, sendo necessário averiguar a existência de algum obstáculo que esteja a impedir a cravação do cone.

Em Portugal, assume-se um número máximo de 60 pancadas. Caso estas não forem suficientes para o amostrador penetrar 150 mm na primeira fase ou 300 mm na segunda e terceira fase, ocorre a “nega”.

Embora estas características correspondam ao ensaio SPT original, é necessário ter em conta que o ensaio não se encontra totalmente normalizado, e que os resultados do mesmo irão depender de diversos fatores, tais como o tipo de equipamento utilizado, da norma, da limpeza do fundo do furo, entre outros.

Para a devida utilização do valor NSPT a norma EN ISO 22476-3: 2006 recomenda várias correções a serem adotadas ao número obtido diretamente do ensaio SPT, de forma a permitir corrigir e normalizar os resultados do ensaio.

Os fatores a serem corrigidos são a energia transmitida ao trem de varas (C_E), os efeitos do comprimento do trem de varas (C_R), os efeitos causados pelos diferentes diâmetros nos furos (C_D) e as alterações causadas devido ao nível de tensões efetivas à profundidade do ensaio (C_N).

Após a verificação da aplicação das correções, obtém-se o $(N_1)_{60}$ de forma a determinar o valor normalizado e corrigido para uma tensão vertical de uma atmosfera (Equação 1).

Equação 1 – Cálculo para obtenção do valor normalizado.

$$(N_1)_{60} = NSPT \times C_E \times C_R \times C_D \times C_N$$

Sendo:

- NSPT – Valor obtido do ensaio SPT;
- $(N_1)_{60}$ – Valor de N_{60} normalizado a 60% da energia;

- C_E – Coeficiente corretivo relacionado com a energia transmitida ao trem de varas;
- C_R – Coeficiente corretivo relacionado com o comprimento do trem de varas;
- C_D – Coeficiente corretivo relacionado com o diâmetro do furo;
- C_N – Coeficiente corretivo relacionado com o efeito da sobrecarga em solos arenosos.

Normalmente, a equação anterior é simplificada devido a discordâncias entre os autores pelo desprezo dos coeficientes relacionados ao trem de varas (C_R) e do diâmetro do furo (C_D). Assim, a seguinte Equação 2 demonstra o cálculo simplificado para as simplificações realizadas.

Equação 2 – Cálculo simplificado para obtenção do valor normalizado.

$$(N_1)_{60} = NSPT \times C_E \times C_N$$

Quando se está a tratar de solos não granulares, é utilizado o valor obtido no ensaio corrigido para um aparelho com eficiência de energia de cravação de 60% (N_{60}), pelo que se recorre a uma outra equação (Equação 3). Nota-se, também, que o coeficiente corretivo de sobrecarga em solos arenosos (C_N), utilizado apenas em solos granulares, não é aplicado neste caso.

Equação 3 – Cálculo para solos não granulares.

$$N_{60} = NSPT \times C_E$$

Sendo:

- N_{60} – Valor de N considerando a energia de referência de 60%.

b) Penetração Dinâmica

Os ensaios de Penetração Dinâmica são idênticos aos ensaios SPT e são utilizados para reconhecer e analisar a litologia e propriedades geomecânicas dos solos, além de estimar a sua resistência à penetração. O EuroCódigo 7 (ENV 1997-3) e, mais recentemente, a EN ISO 22476-2, indicam quatro tipos de penetrómetros dinâmicos, sendo estes o leve (DPL), médio (DPM), pesado (DPH) e super-pesado (DPSH). Embora este tipo de ensaios não forneça amostras dos solos atravessados, contrariamente ao SPT, têm registo contínuo, pelo que permitem uma visualização pormenorizada da variação das resistências à penetração com a profundidade (*Martins & Miranda, 2003; Afonso & César, 2016*).

A Tabela 4 apresenta as características dos vários penetrómetros referidos anteriormente.

Tabela 4 – Tipos de penetrómetros dinâmicos e as suas características (adaptado de Matos Fernandes, 2021).

Tipo	Sigla	Massa do martelo (kg)	Área da base do cone (cm ²)	Energia Específica / pancada (Kj/m ²)
Ligeiro ou leve	DPL	10	10	50
Médio	PDM	30	10	150
Pesado	DPH	50	15	167
Superpesado	DPSH	63,5	20	238

O equipamento deste ensaio inclui um conjunto de varas, um pilão, um cone e um dispositivo de medição. Tal como o ensaio SPT, para atingir certa profundidade é necessário um certo número de pancadas, que irá corresponder à resistência mecânica de penetração do solo. Esta penetração resulta da cravação de uma ponteira cônica metálica no terreno, através da queda de um martelo de determinada massa e determinada altura sobre um batente, que fornece energia às varas ligadas à ponteira. Dependendo da massa do martelo, é definida uma distância de penetração e os golpes são contados, fornecendo um registo contínuo juntamente com a profundidade (*Fernandes & Chaminé, 2023*). Normalmente, para cada ensaio são registadas as pancadas necessárias para cada 10 cm ou 20 cm de profundidade, dependendo do ensaio a realizar.

2.1.5. Instrumentação

Piezómetros

Os piezómetros são instrumentos de medida utilizados para avaliar a pressão hidrostática e o nível de água subterrânea presente nas obras geotécnicas. Este equipamento permite obter a posição e a variação do nível freático ao longo do tempo, permitindo o planeamento e construção em áreas com elevada pressão hidrostática e o controlo da construção de aterros.

Existem dois tipos de piezómetros, podendo ser estes:

- Piezómetros de tubo ascendente – Consiste na inserção de um tubo ranhurado envolvido em areão e componentes bentoníticos que isola um furo de sondagem, medindo diretamente o nível da água. Isto permite que o aumento ou decréscimo de pressão hidráulica conduza à subida ou descida da água dentro do tubo (*Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011*). Também é o piezómetro mais utilizado visto que, apesar destas características, também é um método mais simples e barato.
- Piezómetros com diafragma – onde se incluem os piezómetros de corda vibrante, piezómetros pneumáticos e piezómetros *strain-gauge* (*Pinho, 2024*).

Segundo *Vieira da Silva (2022)*, a utilização do piezômetro é condicionante para verificar a estabilidade de taludes, elaborar projetos e construir em terrenos com grandes pressões intersticiais e controlar as construções de aterros. A Figura 9 apresenta um exemplo de utilização de um piezômetro.



Figura 9 – Exemplo de utilização de um piezômetro (Retirado de: <https://www.progeo.com.br/piezometro#group1-4>).

2.2. Ensaios Geoambientais

2.2.1. O solo e a sua importância

A definição de solo tem evoluído ao longo dos anos e pode variar em função dos objetivos que se pretendem alcançar com a sua utilização (e.g., *Aires-Barros, 1991; ASTM, 2003; Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011; Carvalho, 2014*). O solo está presente no nosso dia a dia e desempenha várias tarefas essenciais para a vida na Terra. Este é caracterizado por uma grande variabilidade, sendo composto por partículas minerais, matéria orgânica, água, ar e organismos vivos (*Aires-Barros, 1991*).

Primeiramente, o solo desempenha um papel fundamental na formação dos diversos cursos de água, que tornam possível a existência de grande parte dos organismos que existem na Terra. Isto admite que a qualidade do solo se encontra diretamente relacionada com a qualidade da água subterrânea (e.g., *Afonso et al., 2016; Martins Carvalho, 2016*).

A saúde humana também se encontra relacionada com a qualidade do solo, pois este é a base de muitos antibióticos e reguladores do clima global, permitindo o equilíbrio dos gases na atmosfera (*Azevedo, 2013*).

Na engenharia, a descrição dos solos e rochas é um contributo bastante significativo para a investigação do terreno, nomeadamente no registo de campo. O diário de campo deve registar os materiais e estratos vistos num furo, poço de ensaio ou outro tipo de investigação, ou até registar uma exposição como, por exemplo, a face de uma pedreira. Na geotecnia, o registo de campo abrange dados digitais implícitos ao registo de campo, que inclui descrições dos estratos encontrados e outras observações de campo que possam ser importantes para obras futuras. Assim, o registo de campo sustenta toda a compreensão e informação das condições do solo no local e é o que resta após a realização da investigação, podendo ser utilizado para muito mais do que apenas o relatório de investigação (e.g., *Martins Carvalho, 2016; Norbury, 2020*).

A degradação do solo, onde ocorrem perdas das suas qualidades físicas, químicas ou biológicas, é um processo natural que está a ser acelerado pela atividade humana (detalhes em *Aires-Barros, 1991*).

2.2.2. Contaminação dos solos

A contaminação do solo com substâncias tóxicas constitui um problema mundial grave e tem impacto direto na qualidade da água, ar, biodiversidade e alterações climáticas, podendo ameaçar a segurança dos alimentos e prejudicar a saúde dos cidadãos (*CCE, 2006*).

Na geotecnia, após a escavação de um solo, o mesmo pode ser reutilizado no próprio local (na obra), encaminhado para reutilização noutra local (como obra ou reperfilamento de terreno) ou ainda pode ser considerado como resíduo, quando o mesmo não pode ser reutilizado nem cumpre os critérios de subproduto. De acordo com o Regime Geral de Gestão de Resíduos – NRGGR –, os solos e rochas que não forem utilizados na obra de origem terão de ser geridos de acordo com os trâmites associados à gestão de resíduos, devendo ser apreciados de acordo com a definição de resíduo e com as disposições relativas a subprodutos.

Após terem sido realizadas análises *in situ* nos terrenos e colheita de amostras de solo e/ou águas subterrâneas, as amostras são submetidas a ensaios físicos, químicos e biológicos de forma a verificar se existe contaminação do solo, determinando concentrações dos poluentes e avaliando a lixiviação dos contaminantes. Para isso, são utilizados os valores de referência da APA para os principais contaminantes do solo, a utilizar no processo da avaliação da qualidade do solo e de confirmação dos resultados alcançados com a remediação. Assim, o valor de referência entende-se como a concentração de um contaminante no solo acima da qual pode haver um determinado risco para a saúde humana e/ou para o ambiente, enquanto o contaminante é caracterizado pela substância presente no solo formada pela ação antropogénica. Para tal, deverá ser elaborado primeiramente um plano de amostragem de solo de acordo com o “Guia Técnico - Plano de

Amostragem e Plano de Monitorização do solo”, APA (2019, 2022a,b), cujos valores obtidos são comparados com os valores de referência para o solo.

O objetivo do Plano de Amostragem do Solo é detetar e medir, por meio de análises laboratoriais, os contaminantes presentes no solo e na água, bem como delimitar, em extensão e profundidade, uma primeira distribuição espacial destes. Este pode ser desenvolvido na fase de avaliação detalhada da qualidade do solo de forma a otimizar a malha de amostragem (APA,2019, 2022a,b). Assim, o Plano de Amostragem do Solo deve considerar os elementos constantes no Guia Técnico da Agência Portuguesa do Ambiente, designadamente a geometria da malha de amostragem e número de sondagens, a técnica de amostragem, profundidade da recolha das amostras, tipo de amostra e respetivo protocolo de amostragem, programa analítico, sistema de controlo de qualidade e, por fim, entidade para a recolha das amostras. O plano de amostragem deve incluir alguns elementos como:

- Meios a amostrar;
- Programa analítico;
- Calendário de amostragem;
- Número de sondagens e a sua distribuição;
- Georreferenciação de cada sondagem;
- Planta à escala adequada;
- Número de amostras a recolher em cada sondagem;
- Profundidade prevista de recolha das amostras em cada sondagem e a sua justificação;
- Tipo de amostras a recolher e dimensão das mesmas;
- Métodos de recolha das amostras e protocolo de amostragem;
- Embalagem, rotulagem, preservação e transporte das amostras;
- Sistema de controlo de qualidade;
- Indicação de eventuais ensaios realizados in situ e dos métodos e equipamentos utilizados;
- Entidade(s) selecionada(s) para a recolha das amostras;
- Laboratórios (s) selecionado(s) para a realização do programa analítico.

Já o Plano de Monitorização do Solo tem como finalidade recolher dados que possibilitem analisar como a contaminação do solo e dos meios afetados pela mesma evolui ao longo do tempo e espaço.

No contexto de um projeto de remediação ou após a sua conclusão, este plano procura verificar a eficácia das medidas de descontaminação. Este deve incluir, no mínimo, os seguintes elementos:

- Descrição da monitorização a realizar (tipo e localização da instrumentação a utilizar);
- Duração e periodicidade da monitorização, devidamente fundamentadas;
- Plano de Amostragem.

Por outro lado, nas remediações ex situ, o Plano de Monitorização deve contemplar o seguinte:

- Sondagens na base e taludes do vazio de escavação, antes do seu enchimento;
- Sondagens nos locais de deposição temporária dos solos contaminados removidos ou em áreas que possam ter sido afetadas devido à remoção dos mesmos.

Quando é necessário discutir sobre a legislação relativa aos problemas relacionados com solos contaminados, é utilizada a Norma de Ontário referente aos valores de referência utilizados, sendo também utilizada a legislação e os Decretos de Lei de Portugal.

Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), é recomendada a utilização da norma de Ontário, como critério de referência para definir a qualidade de um solo. Os valores de referência e documentação técnica utilizados na APA são adaptados das Normas de Ontário (publicados no documento “Soil, Ground Water and Sediment Standards for Use Under Part XV.1 of the Environmental Protection Act”, Ministry of the Environment, April 15, 2011), cujo documento descreve o processo de desenvolvimento e revisão dos valores genéricos para solos e águas subterrâneas. Caso não se disponha do estado inicial ou de valores de fundo naturais ou não estejam definidos valores de referência, poderão ser utilizados valores nacionais ou internacionalmente reconhecidos, desde que a APA os aceite, mas sempre de forma científica fundamentada.

Para se proceder à utilização da tabela de valores de referência para o solo numa dada situação, é necessário caracterizar o local e a sua envolvente, de forma a determinar:

- A textura do solo;
- A profundidade do substrato rochoso;
- O pH do solo superficial e subsuperficial;
- Se o local se encontra numa área classificada no SNAC (constituído pela Rede Nacional de Áreas Protegidas) ou a menos de 30 m de uma área classificada no SNAC;
- Se o local se encontra a menos de 30 m de uma massa de água superficial;

- A existência de captações de água subterrânea num raio de 250 m a contar do limite do local em análise;
- A existência de perímetros de proteção de captações de água subterrânea que envolvam parte ou a totalidade dos limites do local em análise.

Segundo a APA (2019,2022a,b), existem 5 tabelas de valores de referência para o solo, que correspondem às tabelas de A a E e que se encontram apresentadas na Tabela 5, com as respetivas características para cada uma delas.

Tabela 5 - Valores de Referência (Adaptado de: APA, 2019, 2022a,b).

Tabelas	Valores de Referência
Tabela A: Valores de referência para solos em locais ambientalmente sensíveis	Considerando-se um local ambientalmente sensível: • Aquele que se insere ou se encontra a menos de 30 m do limite de uma área classificada no Sistema Nacional de Áreas Classificadas (SNAC); • Aquele cujo pH do solo superficial é inferior a 5 ou superior a 9; • Aquele cujo pH do solo subsuperficial é inferior a 5 ou superior a 11.
Tabela B: Valores de referência para solos a menos de 30 m de uma massa de água superficial	Considerando-se uma massa de água superficial, uma massa distinta e significativa de água superficial, designadamente uma albufeira, um ribeiro, rio ou canal, um troço de ribeiro, águas de transição ou uma faixa de águas costeiras.
Tabela C: Valores de referência para solos pouco profundos	Considerando-se um solo pouco profundo quando, em pelo menos 1/3 da área do local, a camada de solo sobre o substrato rochoso é igual ou inferior a 2 m, contabilizada desde a sua superfície e excluindo qualquer camada artificial.
Tabela D: Valores de referência para uma remediação estratificada do solo	Considerando um solo com profundidade superior a 2 m, a contar desde a superfície, excluindo qualquer camada artificial, pode-se optar por uma remediação em toda a sua profundidade (Tabela E) ou por uma remediação estratificada (tendo como condição que o solo desse local não seja escavado). Caso seja necessário escavar o solo, a avaliação da qualidade do mesmo deverá ser determinada com recurso à Tabela E.
Tabela E: Valores de referência genéricos para o solo	Quando não são aplicáveis as Tabelas A, B e C, e não se optar pela tabela D, pode-se recorrer à Tabela E, caso seja opção.

É de elevada importância referir que, para cada tabela, existem valores de referência tanto para uso agrícola como para uso urbano, industrial e comercial, podendo também haver valores para utilização ou não utilização de água subterrânea.

De acordo com o local em análise, irá ser escolhida a tabela de valores de referência mais adequada. A Figura 10 apresenta o fluxograma para a seleção mais adequada da tabela de valores de referência.

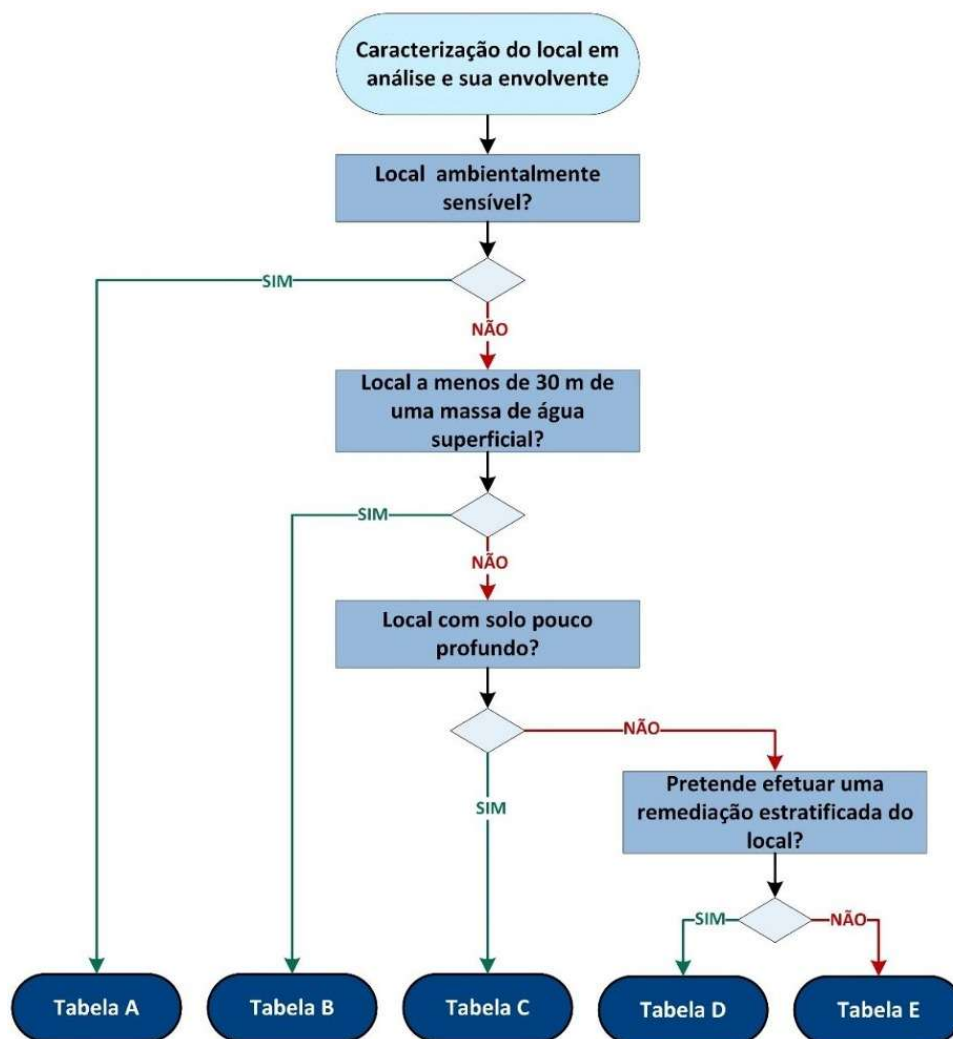


Figura 10 – Fluxograma para seleção da tabela de Valores de Referência adequada (Retirado de APA, 2025).

A seguinte Figura 11 apresenta as características dos valores de referência a utilizar para os solos, fixados nas Normas de Ontário e definidos para diferentes usos do solo, considerando vias de exposição preferenciais e recetores potencialmente expostos.

TABELA A – VALORES DE REFERÊNCIA PARA SOLOS EM LOCAIS AMBIENTALMENTE SENSÍVEIS

Número CE	Número CAS	Contaminante	Valores de referência (mg/kg peso seco)	
			Uso agrícola	Uso urbano / industrial / comercial
6	83-32-9	acenafteno	0,05	0,072
1	208-96-8	acenaftileno	0,093	0,093
2	67-64-1	acetona	0,5	0,5
200-215-8	309-00-2	aldrina	0,05	0,05
231-146-5	7440-36-0	antimónio	1	1,3

Identificador de substâncias para fins regulatórios

Identificador para substâncias químicas

Os valores de referência dependem do uso do solo

Figura 11 – Características dos valores de referência para solos (Adaptado de APA, 2019).

2.2.3. Resíduos

Os resíduos caracterizam-se como qualquer substância ou objeto que já não tem uso por parte de pessoas, indústrias, ou até mesmo serviços, pelo que os seus utilizadores se desfazem dos mesmos.

Os resíduos podem ser classificados como:

- Resíduos Urbanos: Provenientes de atividades domésticas, comerciais e de serviços nas áreas urbanas;
- Resíduos Industriais: Gerados por processos industriais;
- Resíduos Hospitalares: Com origem nos estabelecimentos de saúde;
- Resíduos de Construção Civil: Provenientes de obras de construção e demolição;
- Resíduos Agrícolas: Provenientes da atividade agrícola e pecuária;
- Resíduos de Serviços de Saúde: Provenientes de ambulatórios e áreas de atendimento médico.

Elaborado pela APA, o guia de classificação de resíduos fundamenta-se em estudos da Comissão Europeia e da 'Environment Agency', contando com a colaboração de diversas entidades portuguesas. Este visa evitar e reduzir riscos ambientais e para a saúde através da correta separação e classificação de resíduos na sua origem. É crucial que os resíduos estejam devidamente separados e classificados na origem para que o seu destino final seja o mais apropriado.

O processo de classificação de resíduos na União Europeia desenvolve-se geralmente em duas fases:

- Classificação de acordo com a Lista Europeia de Resíduos (LER);
- Avaliação de perigosidade que os resíduos apresentam.

A classificação dos resíduos é, na sua maioria, realizada de acordo com a LER, publicada na Decisão 2014/955/EU. A lista harmonizada por esta classificação considera a origem e a composição dos resíduos, estabelecendo códigos de seis dígitos para diferentes tipos de resíduos. Em termos dos códigos LER possíveis, existem duas hipóteses (as chamadas “entradas espelho”) para os solos e rochas provenientes de obras de construção civil, sendo estas: 17 05 03 Solos e Rochas contendo substâncias perigosas; e 17 05 04 Solos e Rochas não abrangidos em 17 05 03. Ainda é igualmente possível que o código LER 17 09 04 seja atribuído ao material escavado – Misturas de resíduos de construção não abrangido em 17 09 01, 17 09 02 ou 17 09 03.

Os solos e as rochas com o código LER 17 05 03 (solos e rochas contendo substâncias perigosas) são considerados resíduos perigosos e apenas podem ser eliminados em Aterros de Resíduos Perigosos ou outros operadores autorizados para receber resíduos perigosos.

Por sua vez, os solos e rochas com o código LER 17 05 04 (solos e rochas não abrangidos pelo 17 05 03) podem ser eliminados em Aterros de Resíduos Inertes, vazadouros equiparados a Aterros de Inertes, ou em Aterros de Resíduos Não Perigosos, desde que cumpram todas as condições estabelecidas na legislação aplicável e nas respetivas licenças (nomeadamente nas concentrações totais dos diversos poluentes no solo, bem como à qualidade do eluato).

Tal como referido anteriormente, quando o solo escavado não pode ser reutilizado nem cumpre os critérios de subproduto de acordo com a “Classificação de solos e rochas como subproduto” (APA, 2021), este é classificado como resíduo, sendo necessário verificar a sua admissibilidade em possíveis aterros, de acordo com as suas características (Figura 12).



Figura 12 – Avaliação da admissibilidade em aterro.

Existem três níveis para a realização do processo de determinação da admissibilidade de resíduos em aterro, sendo estes (APA, 2021):

- Caracterização básica pelo produtor ou detentor – Visa obter o máximo de informações possível acerca do resíduo, tais como a sua origem, composição físico-química, entre outros;
- Verificação da conformidade pelo produtor ou detentor – Consiste na verificação periódica do resíduo em questão, de forma a verificar se este se mantém conforme os resultados da caracterização básica e com os critérios de admissão aplicáveis;
- Verificação no local pelo operador – Esta etapa é realizada de forma a verificar se, aquando da receção dos resíduos, se estes correspondem e estão conforme os que foram sujeitos à caracterização básica e, se aplicável, à verificação de conformidade, e que estão descritos nos documentos que os acompanham.

De acordo com o n.º1 do artigo 91.º do Regime Geral de Gestão de Resíduos (RGGR), são considerados subprodutos quaisquer substâncias ou objetos que resultam de um processo produtivo, cujo principal objetivo não seja a sua produção, quando verificadas as seguintes condições:

- Existir a certeza de posterior utilização lícita da substância ou objeto;
- Ser possível utilizar diretamente a substância ou objeto;
- A produção ser parte integrante de um processo produtivo;
- A substância ou objeto cumprir os requisitos relevantes como produto em matéria ambiental e de proteção da saúde e não acarretar impactes globalmente adversos do ponto de vista ambiental ou saúde humana, face à posterior utilização específica.

O Novo Regime Geral das Gestão de Resíduos (NRGGR), aprovado no anexo I do Decreto-Lei nº.102-D/2020, de 10 de dezembro, define no artigo 2.º quais os resíduos cuja gestão se encontra excluída do seu âmbito de aplicação. Os solos e rochas escavados e não contaminados, provenientes de atividades de construção, podem ser utilizados no local que foram escavados ou fora do mesmo, encontrando-se abrangidos pelo NRGGR.

A Autoridade Nacional de Resíduos (ANR) pode autorizar a classificação como subproduto de certas substâncias ou objetos que provêm de um processo produtivo, cujo principal objetivo não seja a sua produção, desde que sejam cumpridos certos critérios e condições.

Ainda se dão como resíduos não admissíveis em aterro resíduos líquidos, resíduos que nas condições de aterro sejam explosivos, corrosivos, oxidantes, muito inflamáveis ou inflamáveis, resíduos hospitalares de risco infeccioso, pneus usados e resíduos que tenham sido objeto de recolha seletiva para reutilização e reciclagem.

É de elevada importância referir ainda que o princípio da hierarquia dos resíduos continua a ser fundamental, com metas estabelecidas para a redução da deposição em aterro de resíduos recicláveis ou valorizáveis até ao ano de 2030.

2.2.4. Avaliação da admissibilidade em aterro para resíduos inertes

A avaliação da admissibilidade em aterro para resíduos inertes encontra-se detalhada pelo Decreto-Lei n.º 102-D/2020. De acordo com este regime, para um determinado solo ser depositado em aterro para resíduos inertes é necessário que este cumpra os critérios de admissão estabelecidos na parte B do anexo II do Decreto-Lei n.º 102-D/2020. No entanto, é expressamente proibida a deposição de solos provenientes de locais contaminados nestes aterros.

Na secção 2.1 para o caso dos resíduos inertes, é apresentada uma lista de resíduos que se prevê preencherem os critérios de resíduos inertes e os critérios de admissibilidade, sendo que não precisam de ensaios para a sua caracterização básica. Esta lista, referente à Tabela 1, inclui:

- Resíduos de materiais fibrosos à base de vidro (apenas sem aglutinantes orgânicos);
- Embalagens de vidro;
- Betão (só resíduos de Construção e Demolição (RCD) seleccionados);
- Tijolos (só RCD seleccionados);
- Ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos (só RCD seleccionados);
- Mistura de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos (só RCD seleccionados).

Caso haja alguma suspeita de contaminação – podendo ser tanto por inspeção visual ou por conhecimento da origem dos resíduos –, deverão ser realizados ensaios para os resíduos em questão ou ser recusados. Caso haja um elevado nível de contaminação dos resíduos, nomeadamente metais, amianto, plásticos, entre outros, os resíduos não poderão ser admitidos neste tipo de aterros. As Figuras 13 e 14 (nomeadamente as Tabelas n.º2 e n.º3 do Decreto-Lei n.º102-D/2020) apresentada a seguir, apresenta os valores limites para a admissão em aterros para resíduos inertes, pelo que os resíduos admissíveis deverão cumprir os mesmos.

TABELA N.º 2

Valores-limite de lixiviação para aterros de resíduos inertes

Componentes	mg/kg de matéria seca L/S (*) = 10 l/kg
As	0,5
Ba	20
Cd	0,04
Cr total	0,5
Cu	2
Hg	0,01
Mo	0,5
Ni	0,4
Pb	0,5
Sb	0,06
Se	0,1
Zn	4
Cloreto (c)	800
Fluoreto	10
Sulfato (c)	(a) 1 000
Índice de Fenol	1
COD	(b) 500
SDT (c)	4 000

(*) Relação líquido para sólido para libertação total.

(a) Se o resíduo não satisfizer este valor, pode continuar a ser considerado conforme aos critérios de admissão desde que a lixiviação não exceda o valor de 6000 mg/kg a L/S = 10 l/kg, determinado por um ensaio de lixiviação em lotes (Série EN 12457) ou por um ensaio de percolação em condições semelhantes às verificadas no aterro (EN 14405:2017).

(b) Se o resíduo não satisfizer este valor relativamente ao COD ao seu próprio valor de pH, este pode ser alternativamente verificado com L/S = 10 l/kg e a um pH entre 7,5 e 8,0. O resíduo pode ser considerado conforme aos critérios de admissão para COD se o resultado dessa determinação não exceder 500 mg/kg.

(c) Os valores para sólidos dissolvidos totais (SDT) podem ser utilizados em alternativa aos valores para o sulfato e o cloreto.

Figura 13 - Valores limites de lixiviação para a admissibilidade em aterros para resíduos inertes (Adaptado de: DL n.º 102-D/2020).

TABELA N.º 3

Valores-limite para o teor total de parâmetros orgânicos, para aterros de resíduos inertes

Parâmetros	mg/kg
COT	(a) 30 000
BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno)	6
PCB (policlorobifenilos 7 congêneres) (b)	1
Óleo mineral (C10 a C40)	500
HAP (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos) (c)	100

(a) No caso de solos, a entidade licenciadora pode aceitar um valor-limite superior, no máximo até ao dobro do valor definido, desde que seja respeitado o valor-limite do COD, previsto na tabela n.º 2, para o pH do próprio solo ou a um pH entre 7,5 e 8,0.

(b) PCB 28 — (2,4,4' — triclorobifenilo), PCB 52 — (2,2',5,5' — tetraclorobifenilo), PCB 101 — (2,2',4,5,5' — pentaclorobifenilo), PCB 118 — (2,3',4,4',5' — pentaclorobifenilo), PCB 138 — (2,2',3,4,4',5' — hexaclorobifenilo), PCB 153 — (2,2',4,4',5,5' — hexaclorobifenilo), PCB 180 — (2,2',3,4,4',5,5' — heptaclorobifenilo).

(c) Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-cd)pireno, Naftaleno, Fenantreno, Pireno.

Figura 14 - Valores limite para o teor total de parâmetros orgânicos para a admissibilidade em aterros para resíduos inertes (Adaptado de: DL n.º 102-D/2020).

Caso os resíduos sejam admissíveis em aterro para inertes e cumpram os critérios de subproduto definidos na Nota Técnica sobre a classificação de solos e rochas como subproduto, estes poderão ter três opções, sendo estas:

- Deposição em aterro para resíduos inertes;
- Valorização em cimenteira;
- Enchimento de vazios de escavação (pedreiras autorizadas).

2.2.5. Avaliação da admissibilidade em aterro para resíduos não perigosos

A gestão de resíduos não perigosos é regida pelo conjunto de princípios e critérios definidos na legislação, como já referido anteriormente, de forma a proteger a saúde humana e o ambiente (Decreto-Lei n.º102-D2020).

Os resíduos não perigosos podem ser classificados como entradas absolutas de resíduos não perigosos (Abs.RNP), que são sempre considerados não perigosos sem necessidade de avaliação, ou como entradas espelho (Esp.RNP), cuja classificação como perigosos ou não perigosos depende da avaliação das suas características de perigosidade. As entradas de espelho de resíduos não perigosos são aquelas que não apresentam características de perigosidade após a sua avaliação, ou que não excedem os limites de concentração de Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) apresentados na Decisão 2014/955/UE, da Comissão.

Para um resíduo ser admitido nos aterros de resíduos não perigosos, é necessário estar de acordo com vários critérios, nomeadamente:

- Podem ser admitidos sem necessidade de ensaios para caracterização básica:
 - Resíduos urbanos classificados como não perigosos (capítulo 20 da LER);
 - Frações não perigosas de resíduos urbanos recolhidas seletivamente;
 - Resíduos não perigosos de outras origens equiparados aos resíduos urbanos;
- Estes resíduos não podem ter sido sujeitos a tratamento prévio ou apresentar um nível de contaminação que aumente o risco associado aos resíduos já depositados;
- Não podem ser admitidos em células onde sejam depositados resíduos perigosos, estáveis e não reativos;
- Os resíduos admissíveis devem cumprir os valores-limite especificados nas tabelas nºs 4 e 5 compreendidos na Parte B do anexo II (Figuras 15 e 16);
- Materiais não perigosos à base de gesso só podem ser depositados em células onde não sejam admitidos resíduos biodegradáveis, e os valores-limite de COD e COT não podem ser excedidos;

- Os resíduos de construção e demolição que contêm amianto ligado podem ser depositados em aterros para resíduos não perigosos, sem a necessidade de ensaios para caracterização básica.

TABELA N.º 4

Valores-limite de lixiviação para aterros de resíduos não perigosos

Componentes	mg/kg de matéria seca L/S (*) = 10 l/kg
As	5
Ba	100
Cd	2
Cr total	20
Cu	50
Hg	0,5
Mo	10
Ni	10
Pb	10
Sb	0,7
Se	0,5
Zn	50
Cloreto (b)	50 000
Fluoreto	250
Sulfato (b)	20 000
COD	(a) 800
SDT (b)	60 000

Figura 15 - Valores-limite de lixiviação para aterros de resíduos não perigosos, constados na Tabela n.º 4 do DL n.º 102-D/2020.

TABELA N.º 5

Outros valores-limite para aterros de resíduos não perigosos

Parâmetros	mg/kg
COT	(a) 50 000
BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno)	999
PCB (policlorobifenilos 7 congêneres) (b)	50
Óleo mineral (C10 a C40)	999
HAP (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos) (c)	100

Figura 16 - Outros valores-limite para aterros de resíduos não perigosos, constados na Tabela n.º 5 do DL n.º 102-D/2020.

2.2.6. Avaliação da admissibilidade em aterro para resíduos perigosos

A avaliação da admissibilidade de resíduos perigosos em aterro é regida segundo critérios de avaliação específicos e um procedimento de admissão rigoroso. Este é um processo rigoroso que garante a deposição deste tipo de resíduos numa fonte segura, com vista a proteger o meio ambiente e a saúde humana. Segundo os seus termos, apenas podem ser depositados em aterros para resíduos perigosos os resíduos que satisfaçam os critérios de admissão estabelecidos no n.º4 da parte B do anexo II, nomeadamente as Figuras 17 e 18, referentes aos valores-limite de lixiviação e outros limites igualmente importantes.

TABELA N.º 8

Valores-limite de lixiviação para aterros de resíduos perigosos	
Componentes	mg/kg de matéria seca L/S (*) = 10 l/kg
As	25
Ba	300
Cd	5
Cr total	70
Cu	100
Hg	2
Mo	30
Ni	40
Pb	50
Sb	5
Se	7
Zn	200
Cloreto (b)	25 000
Fluoreto	500
Sulfato (b)	50 000
COD	(a) 1 000
SDT (b)	100 000

Figura 17 – Valores-limite de lixiviação para aterros de resíduos perigosos (Retirado de DL n.º 102-D/2020.)

TABELA N.º 9

Outros valores-limite para aterros de resíduos perigosos	
Componentes	Valores
Perda por ignição (PI) (a)	10 %
COT (a)	(b) 6 %
CNA (capacidade de neutralização de ácidos)	(c) Deve ser avaliado

Figura 18 - Outros valores-limite para aterros de resíduos perigosos (Retirado de DL n.º 102-D/2020.)

2.2.7. Operações de remediação dos solos

De acordo com o Decreto-Lei n.º102-D/2020, a remediação dos solos é caracterizada como um procedimento de remoção da fonte de contaminação e de implementação de uma ou mais técnicas de forma a tratar um solo contaminado, incluindo tratamento biológico, físico-químico ou térmico, o confinamento e gestão de risco, entre outros. O objetivo da remediação do solo é controlar, confinar, reduzir ou eliminar os contaminantes e/ou vias de exposição, de forma a impedir que a contaminação seja um risco para a saúde humana e/ou para o ambiente.

A remediação pode ser realizada:

- *In situ*, quando não há remoção do solo, sendo realizada a remediação do mesmo no próprio local;
- *Ex situ*, quando ocorre remoção do solo, podendo ser efetuada a sua remediação no próprio local ou, enquanto resíduo, realizando-se a remediação em estabelecimentos mais adequados.

O método mais utilizado para a remediação de solos é o método de escavação, visto ser mais simples e eficaz, e mais atraente para clientes com curto prazo de desenvolvimento, evitando a necessidade de projetos adicionais.

Outros métodos alternativos para a remediação de solos podem ser os métodos biológicos, os métodos químicos e os métodos físicos. Os métodos biológicos utilizam organismos vivos, como o exemplo de bactérias e plantas, de forma a degradar ou transformar os contaminantes. Já os métodos químicos utilizam reações químicas de forma a destruir, mobilizar, fixar ou neutralizar os contaminantes, usando soluções aquosas ou solventes orgânicos para posterior concentração e tratamento. Por fim, os métodos físicos removem os contaminantes através da escavação, ventilação do solo ou lavagem, separando os contaminantes dos poluentes.

De acordo com o artigo n.º77-D2020, o pedido de licenciamento simplificado para a operação de remediação de solos deve conter dados necessários à identificação do proponente, do local e do responsável pela operação, dados relativos à avaliação da contaminação e definição dos objetivos da remediação e ainda uma descrição aprofundada da operação de remediação dos solos, com um plano bem-adaptado de monitorização e cronograma de forma a averiguar a eficácia da operação.

A ARR (Agência Regional do Ambiente) pode, ainda, permanecer sobre as operações de remediação de solos a outras entidades públicas. Também é de elevada importância ressaltar que as operações de remediação se encontram sujeitas à emissão de licença e vistoria de acompanhamento final da operação pela entidade licenciadora, podendo ainda ser acompanhada por outras entidades que solicitem o acompanhamento das mesmas.

A elaboração de um relatório da remediação do solo é de extrema importância e tem de ser elaborado ou durante a fase de remediação ou no fim da mesma, contendo elementos orientativos sobre a natureza da contaminação antes da remediação, os objetivos pretendidos de remediação e uma estimativa inicial dos solos a remediar.

Capítulo III

Caso de Estudo I: Análise de várias Campanhas de Prospeção Geotécnica – A Importância Crescente da Componente Ambiental em obras geotécnicas

[página propositadamente em branco]

3. Caso de Estudo I: Análise de várias Campanhas de Prospeção Geotécnica – A Importância Crescente da Componente Ambiental em obras geotécnicas

3.1. Considerações Iniciais

Este capítulo foi desenvolvido com o auxílio da Mota-Engil, Engenharia & Construção, S.A. – Departamento de Geotecnia que, com o acesso à plataforma criada pela empresa, “Projeto GIS MEEC”, permitiu o estudo de várias obras geotécnicas realizadas entre os anos 2020 e 2024, com o objetivo de evidenciar a crescente evolução da importância dos estudos geoambientais nas obras geotécnicas.

Assim, este estudo irá envolver a análise de obras geotécnicas com componente ambiental para cada ano pretendido, relacionando os vários ensaios geoambientais que foram realizados para cada obra. Todas estas obras foram realizadas pela Mota-Engil Engenharia & Construção, S.A.

3.2. A importância ambiental nas obras geotécnicas

A geração de áreas contaminadas deve-se, muitas vezes, ao desconhecimento de práticas adequadas ou à falta de consciência das entidades responsáveis, pelo que podem vir a ser prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente, sendo necessário investigá-las e recuperá-las. Isto leva a que a eliminação dos resíduos, sem nenhum controlo, constitua uma fonte de poluição elevada do meio ambiente, pelo que é necessária uma gestão controlada dos resíduos.

Em Portugal, o quadro legislativo e regulamentar da gestão de resíduos tem vindo a evoluir ao longo dos anos, o que tem causado um impacto cada vez mais positivo no meio ambiente.

Na geotecnia, tem sido cada vez mais requisitada a realização de prospeção ambiental, de forma a verificar as condições do solo, garantindo não só a estabilidade e segurança das estruturas, mas também da proteção do meio ambiente e do ser humano e o cumprimento das legislações ambientais.

Em muitos casos, a negligência destes ensaios pode levar a problemas legais, contaminações e até mesmo acidentes ambientais.

3.3. Plataforma GIS MEEC

O servidor “GIS MEEC” é uma plataforma produzida pela Mota-Engil Engenharia & Construção, S.A., equivalente a uma base de dados. Esta base de dados reúne a informação de todas as obras realizadas na empresa, pelo Departamento de Geotecnia, Agregados, e outros, desde o ano de 2000. Todos os anexos referentes a cada obra encontram-se dentro de um ficheiro ZIP, onde cada pasta é referente a uma componente da obra (por exemplo, ensaios laboratoriais, relatório geotécnico e ambiental, peças desenhadas, entre outros).

A seguinte Figura 19 apresenta o servidor GISMEEC, acedido no *browser* da Internet.

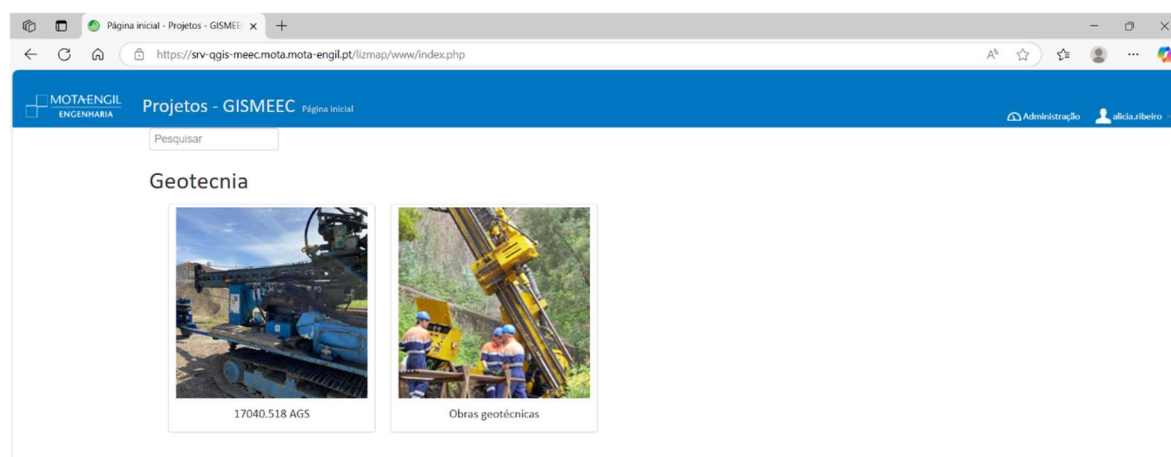


Figura 19 – Apresentação da página inicial do servidor GISMEEC (cortesia: Mota Engil).

Após aceder ao site, e por meio do software Lizmap Web Client, é possível aceder ao mapa QGIS, que permite a visualização da localização de cada obra (neste caso, cada obra corresponde a um ponto), o que se pode observar na Figura 20.

É de elevada importância referir que esta plataforma permite o fácil acesso à consulta dos dados geotécnicos, impressão de mapas e outras funcionalidades diretamente na web. Também facilita a colaboração entre as diversas equipas, permitindo a fácil comunicação e interação com os dados geoespaciais em tempo real.

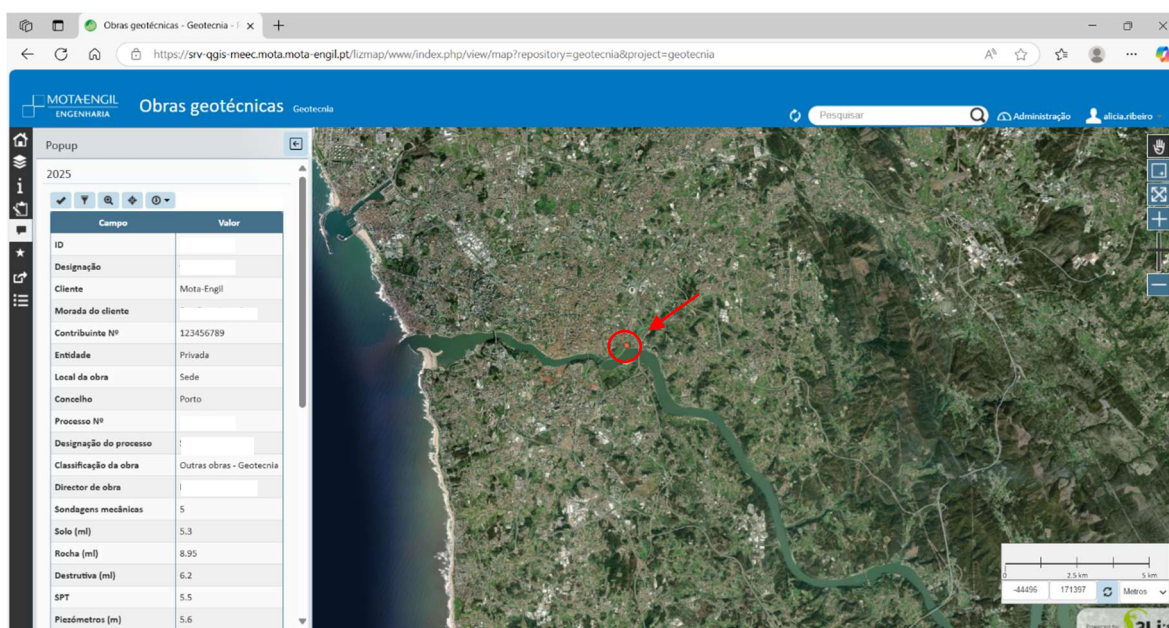


Figura 20 – Visualização do pop-up que contém a tabela de atributos e os ficheiros de uma obra geotécnica.

3.4. Avaliação das campanhas de prospeção realizadas entre os anos de 2020 a 2024

Ao longo dos anos, as campanhas de prospeção têm vindo a aumentar, em consequência ao crescente desenvolvimento do ambiente urbano, aumento da utilização do espaço subterrâneo, crescimento populacional, entre outros fatores que têm vindo a ser cada vez mais importantes ao longo dos tempos.

Entre os anos de 2020 a 2024, as propostas comerciais têm vindo a aumentar, dando uma média de 76 propostas comerciais por ano. Isto significa que para o ano de 2025, haverá, à partida, um crescimento de propostas comerciais para a realização de campanhas de prospeção e ensaios geoambientais. A Tabela 6 e a Figura 21 apresentam as propostas comerciais realizadas para a empresa e gráfico que demonstra a crescente procura na área da prospeção.

Tabela 6 – Propostas comerciais realizadas entre 2020 a 2024, para a empresa Mota-Engil Engenharia & Construção, S.A..

Propostas Comerciais	2020	2021	2022	2023	2024
	48	52	87	108	84

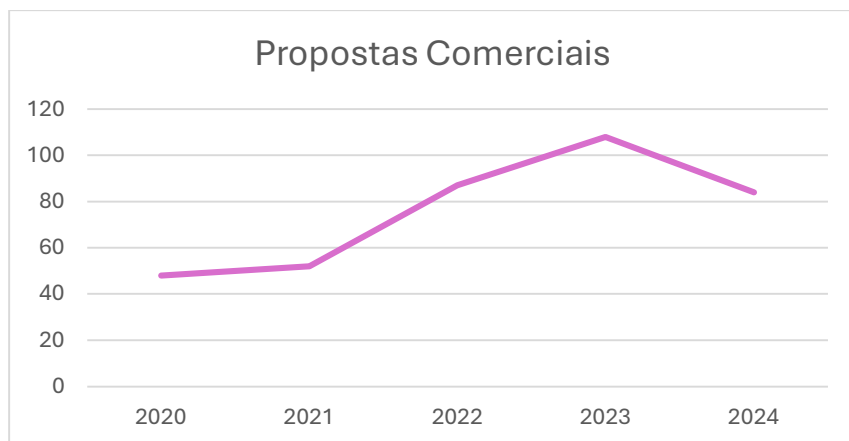


Figura 21 – Gráfico referente à crescente procura na área da prospeção.

Vale a pena também reforçar que a Mota-Engil Engenharia & Construção, S.A. começou a receber solicitações de prospeção geoambiental devido ao aumento da procura por este tipo de ensaios, pelo que a empresa aumentou a sua diversidade neste ramo.

A análise efetuada foca-se na análise quantitativa de:

- Obras apenas com prospeção geoambiental, em que as amostras são entregues ao cliente, sem conhecimento das análises laboratoriais feitas à posteriori;
- Obras de prospeção ambiental com análises laboratoriais solicitadas pelo cliente e efetuadas pela Mota-Engil.

3.5. Avaliação dos Ensaios Ambientais requisitados no ano de 2020

3.5.1. Enquadramento

No ano de 2020 foram realizadas 16 obras de prospeção ambiental, sendo que em 4 destas obras foram requisitados ensaios laboratoriais através da Mota-Engil (Figura 22). Todas as obras encontram-se abrangidas por confidencialidade para com o cliente, pelo que não é permitida a sua identificação.



Figura 22 - Localização das obras geotécnicas realizadas no ano de 2020 (Retirado de: Plataforma GIS MEEC, Mota-Engil).

A Figura 23 apresenta o gráfico relativo às obras realizadas em 2020, e respetivos ensaios requisitados.

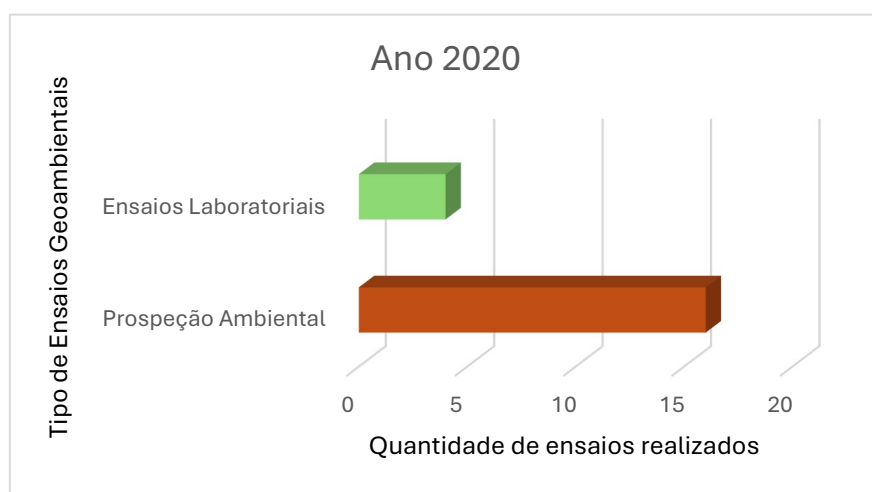


Figura 23 – Gráfico relativo às obras de prospecção ambiental realizadas em 2020.

Com isto, nota-se a pouca procura por ensaios ambientais e obras geotécnicas. Isto pode dever-se à pandemia ocorrida (COVID-19) o que afetou as campanhas de prospecção e respetivos ensaios associados.

3.5.2. Ensaios Ambientais Requisitados

Também é de elevada importância referir que nem todas as campanhas incluíram ensaios geoambientais para averiguar a contaminação e admissibilidade dos solos para aterros. Dentro das 4 obras estudadas, em 2 não se realizaram ensaios de admissibilidade para aterros.

A avaliação da contaminação dos solos foi realizada tendo em conta o documento “Solos Contaminados – Guia Técnico. Valores de Referência para o Solo”, publicado pela APA em janeiro de 2019 (e atualizações em 2022a,b). Neste, são apresentados os valores de referência para o solo para os principais contaminantes do solo a utilizar na avaliação da qualidade do solo, que são adaptados das Normas de Ontário, que constam no documento *Soil, Ground Water and Sediment Standards for Use Under Part XV.1 of the Environmental Protection Act*, de 15 de abril de 2011 (OMEE, 2011a). Para as respetivas campanhas foi utilizada a Tabela E - Valores de Referência para uma Remediação Não Estratificada do Solo do referido Guia, para:

- Uso Residencial com Utilização de Água Subterrânea;
- Uso Comercial/Industrial com Utilização de Água Subterrânea;

A avaliação da admissibilidade em aterro foi efetuada para cada uma das campanhas de acordo com os critérios estabelecidos no Decreto-Lei n.º 183/2009 de 10 de agosto. Os critérios para admissão em aterros de inertes constam das Tabelas n.º 2 (eluato) e n.º 3 (análise para o teor total de parâmetros orgânicos) do anexo IV da Parte B desse diploma.

Já a avaliação da perigosidade foi efetuada com base no Regulamento n.º 1357/2014, de 18 de dezembro.

Para o ano de 2020, foram requisitados os ensaios e respetivas quantidades apresentados na Tabela 7 para as análises laboratoriais.

Tabela 7 – Parâmetros analisados em laboratório no ano 2020.

Matriz	Análises	Ano 2020
Solo	Metais (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni; Pb, Zn);	3
	BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, Xilenos;	2
	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH - 16 substâncias individuais);	2
	COV Organohalogenados;	1
	Policlorobifenilos (PCB - 7 substâncias individuais)	2
	Hidrocarbonetos de Petróleo (C5-C10, C10-C16, C16-C35 e C35-C40)	2
	Carbono Orgânico Total (COT)	2
Eluato	<u>Parâmetros que constam na Tabela II da Parte B do Anexo II do Decreto-Lei n.º 102 D/2020:</u> Metais, cloreto, fluoreto, sulfato, índice de fenol, carbono orgânico dissolvido, sólidos dissolvidos totais.	2
Amianto	Análise quanto à presença de amianto.	1

3.5.3. Avaliação da Contaminação dos Solos

Foram registadas excedências para o arsénio, crómio, cobre e níquel, bem como a excedência de uma amostra no limite de qualificação para a fração C16-C35. O mesmo ocorreu para PAH e coliclorobifenilos.

3.5.4. Avaliação de Perigosidade dos Solos

Não foram identificadas amostras classificadas como resíduos perigosos para qualquer das obras.

3.5.5. Avaliação da Admissibilidade dos Solos

A avaliação da admissibilidade em aterro de inertes foi efetuada de acordo com os valores-limite da Tabela n.º 2 (eluato) e Tabela n.º 3 (parâmetros orgânicos) da Parte B do Anexo IV do Decreto-Lei n.º 183/2009, referente à admissibilidade em aterros de resíduos inertes.

De acordo com os valores-limite considerados para a admissão em aterros de resíduos inertes e aterros de resíduos não perigosos, apenas uma obra demonstrou a presença de uma pequena área que contém amianto na forma de crisótilo (amianto branco) e crocidolite (amianto azul), pelo que deverá ser removido do local e gerido como resíduo perigoso. O resto do material poderá ser admitido num aterro de resíduos não perigosos.

3.6. Avaliação dos Ensaios Ambientais requisitados no ano de 2021

3.6.1. Enquadramento

Para o ano de 2021, foram realizadas 13 obras de prospeção ambiental (Figura 24), sendo que em apenas uma destas obras foram requisitados ensaios laboratoriais. A respetiva obra encontra-se abrangida por confidencialidade para com o cliente, pelo que não é permitida a sua identificação.



Figura 24 – Localização das obras geotécnicas realizadas no ano de 2021 (Retirado de: Plataforma GIS MEEC, Mota-Engil).

A Figura 25 apresenta o gráfico relativo às obras realizadas em 2021, e respetivos ensaios requisitados.

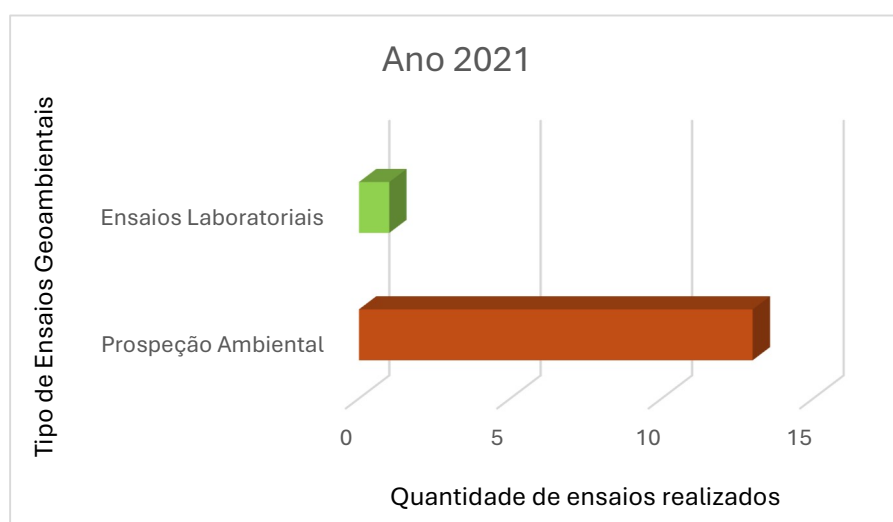


Figura 25 – Gráfico relativo às obras realizadas em 2021.

Nota-se, novamente, uma diminuição de adjudicações. No entanto, em termos de propostas comerciais foi o mesmo. Assim, poderá ser uma especulação e hipótese o facto de a pandemia, por ter começado mais tarde, o número de adjudicações não foi tão afetado como no ano 2021.

3.6.2. Ensaio Ambientais Requisitados

Como já referido anteriormente, apenas foi realizada uma obra onde foram requisitados ensaios laboratoriais pela Mota-Engil, com a execução de ensaios de contaminação e de admissibilidade em aterros. A avaliação da contaminação dos solos foi realizada de acordo com o documento “Solos Contaminados – Guia Técnico. Valores de Referência para o Solo” publicado pela APA em janeiro de 2019. Estes valores são adaptados das Normas de Ontário, que constam no documento *Soil, Ground Water and Sediment Standards for Use Under Part XV.1 of the Environmental Protection Act*, de 15 de abril de 2011 (OMEE, 2011a). Foi utilizada Tabela E – Valores de Referência para Uso Comercial/Industrial com Utilização de Água Subterrânea.

A avaliação de perigosidade foi efetuada com base no Regulamento n.º 1357/2014, de 18 de dezembro. No entanto, foi tido em conta o “Guia de Classificação de Resíduos” da APA, do ano de 2017, que explica com maior pormenor os procedimentos para a classificação de perigosidade.

Já a avaliação da admissibilidade em aterro foi efetuada de acordo com os critérios estabelecidos no Decreto-Lei n.º 183/2009 de 10 de agosto. Foram também utilizadas as Tabelas n.º 2 (eluato) e n.º 3 (teor total de parâmetros orgânicos) do Anexo IV da Parte B deste diploma.

Para o ano de 2021, foram requisitados os ensaios e respetivas quantidades apresentadas na Tabela 8 para os ensaios geoambientais.

Tabela 8 - Parâmetros analisados em laboratório no ano 2021.

Matriz	Análises	Ano 2021
Solo	Metais (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni; Pb, Zn);	1
	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH - 16 substâncias individuais);	1
	COV Organohalogenados;	1
	Hidrocarbonetos de Petróleo (C5-C10, C10-C16, C16-C35 e C35-C40)	1
Eluato	<u>Parâmetros que constam na Tabela II da Parte B do Anexo II do Decreto-Lei n.º 102 D/2020:</u>	1
	Metais, cloreto, fluoreto, sulfato, índice de fenol, carbono orgânico dissolvido, sólidos dissolvidos totais.	

3.6.3. Avaliação da Contaminação dos Solos

Através dos parâmetros analisados e de acordo com os Valores de Referência utilizados, foi notada a excedência de arsénio para todas as amostras estudadas. Uma das análises também registou excedências para 10 dos 16 PAHs analisados.

3.6.4. Avaliação da Perigosidade dos Solos

Nenhuma amostra analisada foi classificada como resíduo perigoso.

3.6.5. Avaliação da Admissibilidade em Aterros

Não foi registada nenhuma excedência aos valores limite da Tabela 2, da Parte B, do Anexo IV, do Decreto-Lei n.º 183/2009, pelo que todos os solos analisados foram admissíveis em aterro.

3.7. Avaliação dos Ensaios Ambientais requisitados no ano de 2022

3.7.1. Enquadramento

Para o ano de 2022, foram realizadas 25 obras de prospeção ambiental (Figura 26), sendo que em 4 destas obras foram requisitados ensaios laboratoriais. As respetivas obras encontram-se abrangidas por confidencialidade para com o cliente, pelo que não é permitida a identificação das mesmas.



Figura 26 – Localização das obras geotécnicas realizadas no ano de 2022 (Retirado de: Plataforma GIS MEEC, Mota-Engil).

A Figura 27 apresenta o gráfico relativo às obras realizadas em 2022, e respetivos ensaios requisitados.

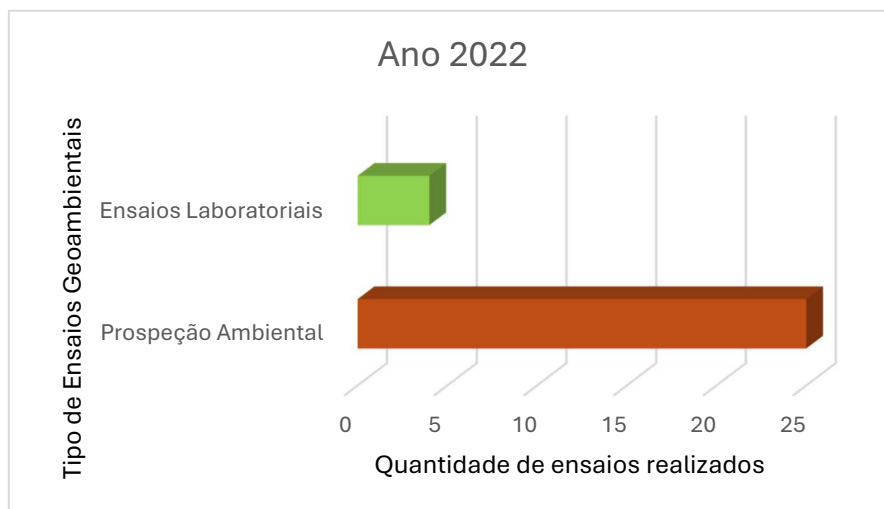


Figura 27 – Gráfico relativo às obras realizadas em 2022.

Com isto, verifica-se novamente um aumento de solicitações de campanhas de prospeção ambiental, incluindo ensaios laboratoriais.

3.7.2. Ensaio Ambientais Requisitados

Para o ano de 2022, todas as obras que requisitaram ensaios laboratoriais incluíram ensaios de contaminação e admissibilidade.

A avaliação da contaminação dos solos foi efetuada com base no documento “Solos Contaminados – Guia Técnico – Valores de Referência para o Solo”, publicado de 2019 pela Agência Portuguesa do Ambiente, e com primeira revisão em julho de 2021.

Também foi considerado o Novo Regime Geral de Gestão de Resíduos – NRGGR – Decreto-Lei n.º 102-D/2020 de 10 de dezembro, que entrou em vigor no dia 1 de julho de 2021 e que revoga o Decreto-Lei n.º 183/2009 de 10 de agosto.

A avaliação da admissibilidade em aterro foi realizada de acordo com os critérios estabelecidos no NRGGR – Decreto-Lei n.º 102-D/2020 de 10 de dezembro. Os critérios para admissão em Aterros de Resíduos Inertes constam na Tabela n.º 2 (eluato) e n.º 3 (teor total de parâmetros orgânicos) do Anexo II, Parte B, deste diploma.

Para as obras em análise, foram utilizados os seguintes Valores de Referência:

- VR da Tabela E, Uso Urbano, considerando uma textura grosseira do solo e utilização de água subterrânea;

- VR da Tabela E, Uso Comercial/Industrial, considerando uma textura grosseira do solo e sem utilização de água subterrânea;
- VR da Tabela B, Uso Urbano, com utilização de água subterrânea e considerando uma textura grosseira do solo.

Para o ano de 2022, foram requisitados os ensaios e respectivas quantidades apresentadas na Tabela 9 para os ensaios geoambientais.

Tabela 9 - Parâmetros analisados em laboratório no ano 2022.

Matriz	Análises	Ano 2022
Solo	Metais (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni; Pb, Zn);	4
	BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, Xilenos;	3
	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH - 16 substâncias individuais);	3
	COV Organohalogenados;	1
	Policlorobifenilos (PCB - 7 substâncias individuais)	4
	Hidrocarbonetos de Petróleo (C5-C10, C10-C16, C16-C35 e C35-C40)	4
	Carbono Orgânico Total (COT)	4
Eluato	<u>Parâmetros que constam na Tabela II da Parte B do Anexo II do Decreto-Lei n.º 102 D/2020:</u>	4
	Metais, cloreto, fluoreto, sulfato, índice de fenol, carbono orgânico dissolvido, sólidos dissolvidos totais.	

3.7.3. Avaliação da Contaminação dos Solos

Em dois dos quatro ensaios geoambientais realizados, as concentrações dos metais encontraram-se todas abaixo dos VRs para UA e UU. Nas restantes, houve excedência para arsénio, mercúrio e chumbo. Também existiram algumas amostras que se encontravam acima dos VR tanto para UA como para UU.

3.7.4. Avaliação da Perigosidade dos Solos

Nenhuma amostra analisada foi classificada como resíduo perigoso.

3.7.5. Avaliação da Admissibilidade em Aterros

Como houve amostras que não apresentam contaminação conforme Uso Agrícola, estas podem ir para pedreira, enquanto as que não cumprem os VR para pedreira cumprem apenas para Aterros de Resíduos Inertes. As amostras que excederam a concentração de arsénio também não poderão ir para pedreira, mas, visto que cumprem os VR para UU, podem ir para Aterros de Resíduos Inertes.

3.8. Avaliação dos Ensaios Ambientais requisitados no ano de 2023

3.8.1. Enquadramento

Para o ano de 2023, foram realizadas 21 obras de prospeção geoambiental (Figura 28), sendo que para 13 destas obras foram requisitados ensaios laboratoriais. Duas destas obras foram divididas em três lotes (um lote para cada localização). As respetivas obras encontram-se abrangidas por confidencialidade para com o cliente, pelo que não é permitida a identificação das mesmas.

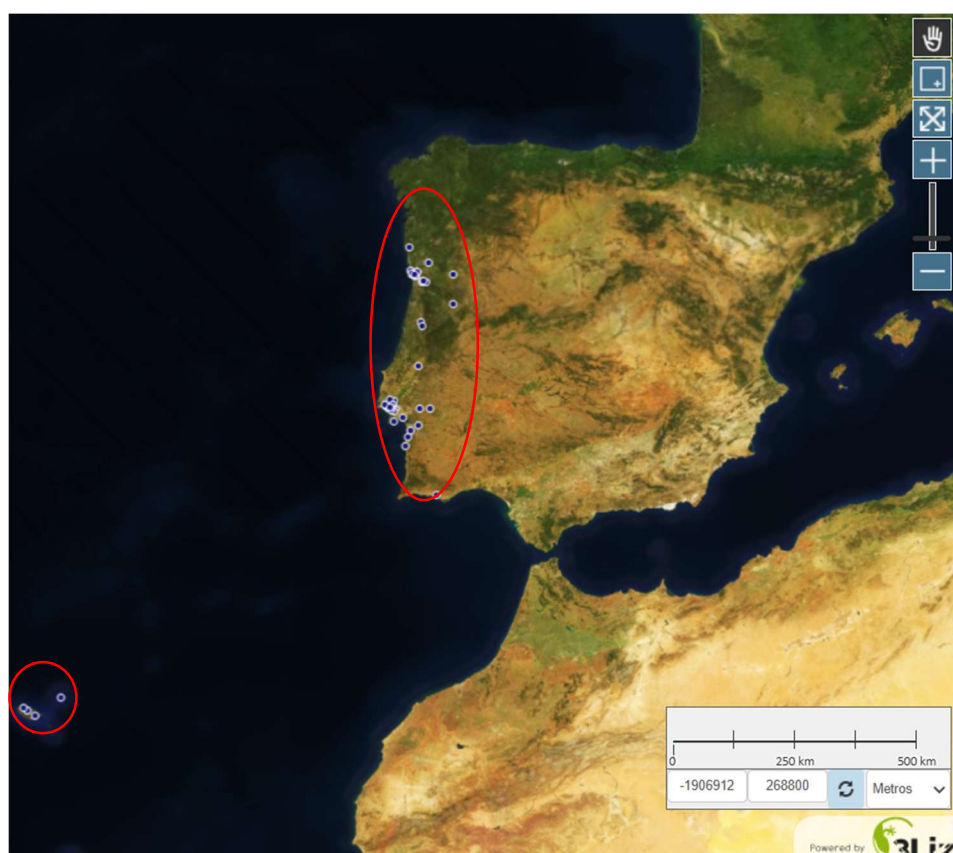


Figura 28 - Localização das obras geotécnicas realizadas no ano de 2023 (Retirado de: Plataforma GIS MEEC, Mota-Engil).

A Figura 29 apresenta o gráfico relativo às obras realizadas em 2023, e respetivos ensaios requisitados.

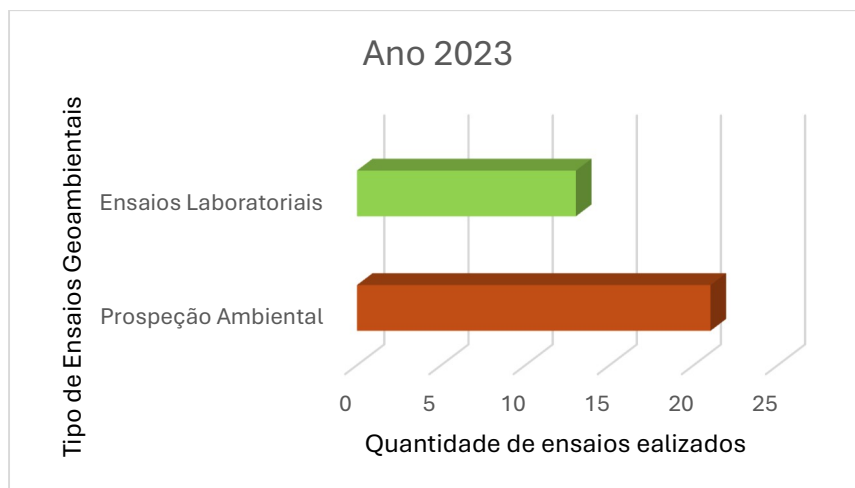


Figura 29 – Gráfico relativo às obras realizadas em 2023.

Como é possível observar do gráfico da figura 29, as obras ambientais começaram a ter uma vasta procura na área geotécnica. Isto demonstra que a componente ambiental nas obras geotécnicas tem vindo a ser cada vez mais importante, quer seja pela proteção ambiental, quer seja pela segurança humana.

3.8.2. Ensaios Ambientais requisitados

Ao longo das vinte e uma obras, foram requisitados ensaios de contaminação e de admissibilidade. Foram apenas duas as obras onde não foi requisitado o ensaio de admissibilidade. Também é de grande importância mencionar que uma das obras ambientais referidas foi realizada por *DeskStudy*, ou seja, foi realizado um estudo histórico superficial e ambiental, para verificar se houve indícios no passado que pudessem causar contaminação, o que poderia levar a um estudo mais aprofundado.

A avaliação da contaminação dos solos foi efetuada com base no documento “Solos Contaminados – Guia Técnico – Valores de Referência para o Solo”, publicado de 2019 pela Agência Portuguesa do Ambiente, e com nova revisão em junho de 2022 (APA, 2022a).

Também foi considerado o Regime Geral da Gestão de Resíduos (NRGGR) na versão mais atualizada (DL n.º 11/2023, 10 de fevereiro).

Para a avaliação da perigosidade dos solos teve-se em consideração a Avaliação e Classificação do anexo à Decisão da Comissão 2014/955/EU, de 18 de dezembro, pelo que os solos escavados podem ser classificados com uma das seguintes entrada espelho da Lista Europeia de Resíduos:

- Resíduos perigosos – código LER 17 05 03 – solos e rochas, contendo substâncias perigosas;

- Resíduos não perigosos – código LER 17 05 04 – solos e rochas não abrangidos em 17 05 03.

Para a avaliação da qualidade dos solos foram aplicados os Valores de Referência da:

- Tabela E (Valores de Referência genéricos para o solo) para uso Comercial, sem utilização de água subterrânea e considerando uma textura grosseira do solo;
- Tabela E, para Uso Urbano, sem utilização de água subterrânea e considerando uma textura grosseira do solo;
- Tabela E, para uso Industrial/Comercial, com utilização de água subterrânea e considerando uma textura grosseira do solo;
- Tabela C, para Uso Comercial, considerando uma textura grosseira do solo e sem utilização de água subterrânea.

Para o ano de 2023, foram requisitados os ensaios e respectivas quantidades apresentadas na Tabela 10 para os ensaios geoambientais.

Tabela 10 - Parâmetros analisados em laboratório no ano 2023.

Matriz	Análises	Ano 2023
Solo	Metais (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni; Pb, Zn);	17
	BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, Xilenos);	15
	Hidrocarbonetos Halogenados	2
	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH - 16 substâncias individuais);	17
	COV Organohalogenados;	14
	Policlorobifenilos (PCB - 7 substâncias individuais)	17
	Hidrocarbonetos de Petróleo (C5-C10, C10-C16, C16-C35 e C35-C40)	17
	Carbono Orgânico Total (COT)	16
Eluato	<u>Parâmetros que constam na Tabela II da Parte B do Anexo II do Decreto-Lei n.º 102 D/2020:</u>	15
	Metais, cloreto, fluoreto, sulfato, índice de fenol, carbono orgânico dissolvido, sólidos dissolvidos totais.	

3.8.3. Avaliação da Contaminação dos Solos

Na sua maioria, foram encontradas, principalmente, excedências para o metal de arsénio. No entanto, apenas em quatro obras foram verificadas outras excedências como o mercúrio, zinco, vanádio, PCBs totais e hidrocarbonetos. Num caso específico, também são encontrados chumbo, zinco e vanádio na mesma amostra, devido à localização do local de amostragem ser adjacente a lagoas de efluentes brutos e cotas de fundo.

3.8.4. Avaliação da Perigosidade dos Solos

Nenhuma das obras conteve amostras classificadas como resíduos perigosos.

3.8.5. Avaliação da Admissibilidade em Aterro

Para a avaliação da admissibilidade em aterro, a maior parte das obras mostraram que os solos poderão ser admissíveis em ARI, sendo que em alguns casos estes também poderão ser utilizados noutras obras ou, ainda, em pedreiras.

Relativamente às amostras que continham concentrações de arsénio superiores aos respetivos VR, os consultores ambientais e as próprias Autoridades Competentes reconhecem que o Granito do Porto (de duas micas) contém concentrações de arsénio naturalmente elevadas em relação ao VR. No entanto, até este VR ser aumentando para um valor mais “realista”, os solos serão muito provavelmente considerados como “contaminados”.

3.8.6. Estudo Preliminar

Relativamente ao estudo preliminar realizado no ano de 2023, não foram encontrados, na área de estudo, indícios claros da presença de fonte(s) de contaminação do local, na forma de depósitos de resíduos com carácter industrial ou de manchas de solos com óleos ou outros líquidos suspeitos, ou zonas com vegetação morta. Foram apenas observados depósitos superficiais de RCD que continham, na sua maioria, cerâmicas e tijolos, bem como garrafas de vidro e pedaços de material queimado (madeira).

3.9. Avaliação dos Ensaios Ambientais requisitados no ano de 2024

3.9.1. Enquadramento

Para o ano de 2024, foram realizadas 18 obras de prospeção geoambiental, sendo que para 7 destas obras foram requisitados ensaios laboratoriais. Uma destas obras foi dividida em três lotes (um lote para cada localização). As respetivas obras encontram-se abrangidas por confidencialidade para com o cliente, pelo que não é permitida a identificação das mesmas.

Visto que as obras do ano de 2024 ainda não se encontram disponíveis na plataforma “GIS MEEC”, não foi possível obter a imagem da localização das mesmas.

A Figura 30 representa o gráfico relativo às obras de prospeção ambiental realizadas em 2024, e respetivos ensaios requisitados.

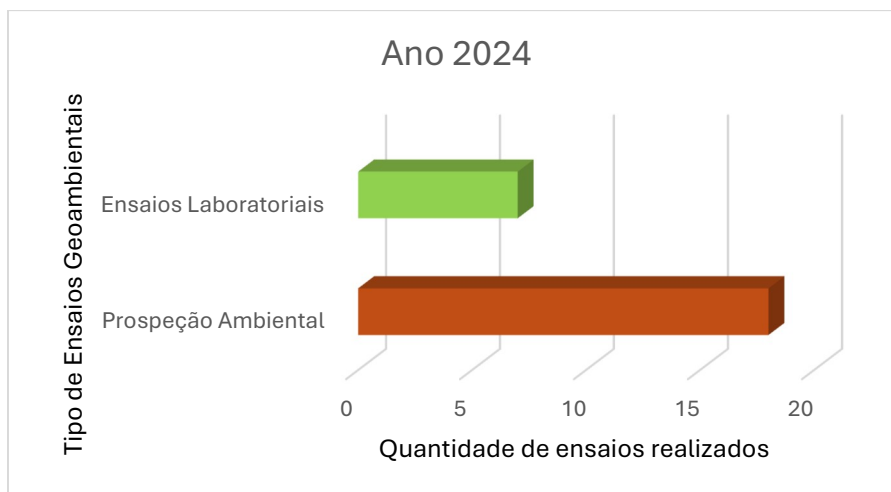


Figura 30 – Gráfico referente às obras realizadas em 2024.

Para este ano nota-se uma ligeira diminuição de obras de prospeção geoambiental, bem como de ensaios laboratoriais. Isto indica que poderemos estar a atingir uma média ou patamar de solicitações de obras de prospeção geoambiental. Esta tendência carece de informação através de uma análise nos próximos anos.

3.9.2. Ensaios Ambientais requisitados

Ao longo das 18 obras, foram requisitados ensaios de contaminação e de admissibilidade. Também é de grande importância mencionar que, mais uma vez, uma das obras de prospeção ambiental referidas foi realizada através de um estudo preliminar, ou seja, foi realizado um estudo histórico superficial ambiental, de forma a verificar se houve indícios no passado que pudessem causar contaminação, o que poderia levar a um estudo mais aprofundado.

Uma das obras de prospeção ambiental realizada foi dividida por três lotes, sendo que cada lote corresponde a uma determinada localização da mesma obra.

A avaliação da contaminação de solos foi efetuada com base no documento “Solos Contaminados – Guia Técnico – Valores de Referência para o Solo”, publicado em janeiro de 2019 pela APA, e com terceira revisão em setembro de 2022 (APA, 2022a). Também foi considerado o Novo Regime Geral de Gestão de Resíduos (NRGGR) na versão mais atualizada (DL n.º 11/2023, de 10 de fevereiro).

Para avaliar a contaminação dos solos, foram considerados os Valores de Referência:

- Tabela C, para Uso Comercial, considerando uma textura grosseira do solo e sem utilização de água subterrânea;

- Tabela C, para Uso Urbano, considerando uma textura grosseira do solo e sem utilização de água subterrânea;
- Tabela E, para Uso Urbano, considerando uma textura grosseira do solo e sem utilização de água subterrânea.

A avaliação da admissibilidade em aterro foi efetuada de acordo com os critérios estabelecidos no NRGGR Decreto-Lei n.º 102-D/2020 de 10 de dezembro, que entrou em vigor no dia 1 de julho de 2021.

Para o ano de 2024, foram requisitados os ensaios e respetivas quantidades apresentadas na Tabela 11 para os ensaios geoambientais.

Tabela 11 – Parâmetros analisados em laboratório no ano 2024.

Matriz	Análises	Ano 2024
Solo	Metais (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni; Pb, Zn);	6
	BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, Xilenos);	5
	Hidrocarbonetos Halogenados	2
	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH - 16 substâncias individuais);	6
	COV Organohalogenados;	5
	Policlorobifenilos (PCB - 7 substâncias individuais)	6
	Hidrocarbonetos de Petróleo (C5-C10, C10-C16, C16-C35 e C35-C40)	5
	Carbono Orgânico Total (COT)	6
Eluato	<u>Parâmetros que constam na Tabela II da Parte B do Anexo II do Decreto-Lei n.º 102 D/2020:</u>	6
	Metais, cloreto, fluoreto, sulfato, índice de fenol, carbono orgânico dissolvido, sólidos dissolvidos totais.	

3.9.3. Avaliação da Contaminação dos Solos

Dos seis ensaios laboratoriais realizados, dois destes apresentaram excedências para metais e PCBs, neste caso:

- Uma obra com excedência de arsénio, cádmio, cobre, mercúrio, chumbo, zinco e PCBs;
- Uma obra com excedência de arsénio, cobre e chumbo.

3.9.4. Avaliação da Perigosidade dos Solos

Para a obra que excedeu os VR de metais e de PCBs, uma das amostras foi considerada como resíduo perigoso devido às elevadas concentrações de cobre, zinco e chumbo, que resultaram da aceção da característica de perigosidade HP14 (Ecotóxico).

3.9.5. Avaliação da Admissibilidade em Aterro

Para a amostra com características de perigosidade, e pela atribuição do código LER, este solo teria o código 17 05 03 (solos e rochas contendo substâncias perigosas. Para as restantes obras e amostras, todas cumprem os Valores Limite estabelecidos no NRGGR e não excedem os VR, pelo que os solos podem ser reutilizados em obra, ou ser admitidos em Aterro de Resíduos Inertes (ARI), destino com o código LER 17 05 04.

3.9.6. Estudo Preliminar

O estudo preliminar realizado em 2024 para uma das obras, foi realizado através da análise da informação histórica e visita ao local e execução de sondagens no âmbito do estudo geológico/geotécnico. Isto permitiu concluir que não foram identificados indícios da presença atual ou histórica, de fontes de contaminação de solos ou águas subterrâneas no local. Assim, não foram recomendadas investigações adicionais para o tema de solos contaminados.

3.10. Breve análise e discussão dos resultados

O presente estudo avaliou a qualidade dos solos de várias campanhas de prospeção geoambientais realizadas entre os anos de 2020 a 2024. Os conceitos apresentados neste relatório destacam a aplicação de vários ensaios, de forma faseada e com claras competências atribuídas a cada entidade. Esta sequência de etapas, e o seu enquadramento no desenrolar das campanhas de prospeção, ensaios geoambientais e avaliação de contaminação e admissibilidade dos solos, assume uma importância vital neste tipo de trabalhos, marcados por incertezas e constrangimentos próprios inerentes aos locais e ambientes onde decorrem.

É de elevada importância referir que a prospeção geoambiental realizada nas várias obras foi imprescindível para a obtenção de amostras para ensaios laboratoriais.

O realce conferido à interligação entre as campanhas de prospeção geoambiental e os ensaios laboratoriais, pretendeu demonstrar a crescente importância ambiental nas obras geotécnicas. De facto, a prospeção, a avaliação da contaminação, perigosidade e admissibilidade em aterros são elementos imprescindíveis, de forma a serem atingidos os objetivos da segurança ambiental e humana.

Assim, e tal como era esperado, foi notado um crescimento significativo nos pedidos de ensaios laboratoriais nas campanhas de prospeção geoambiental, tal como se pode observar no gráfico representado da Figura 31.



Figura 31 – Gráfico que representa o crescimento da inclusão de ensaios laboratoriais na prospeção ambiental.

Da mesma forma, é possível verificar uma diferença significativa entre as solicitações de prospeção geoambiental e ensaios laboratoriais, tal como é demonstrado no gráfico da Figura 32.

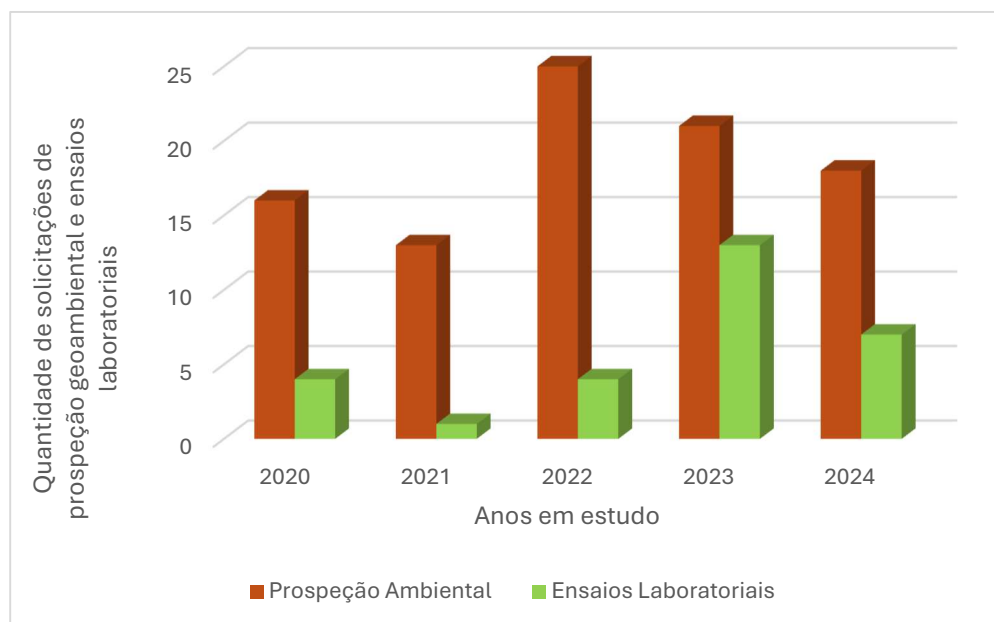


Figura 32 – Gráfico que representa a diferença entre prospeções ambientais com solicitação de ensaios laboratoriais executados pela Mota-Engil entre 2020 e 2024.

Assim é possível observar que, até ao ano de 2023, houve um aumento significativo na inclusão de prospeção ambiental e consequentes ensaios laboratoriais. No entanto, no ano de 2024, houve uma diminuição destes dois fatores. Isto poderá ser um indício de que a empresa esteja a atingir uma média ou patamar de solicitações de obras de prospeção ambiental, o que terá de ser estudado e analisado futuramente. Isto também se poderá dar devido às restantes empresas da área de geotecnia também terem sido alvo de solicitações para a realização de prospeção ambiental

e ensaios laboratoriais, e também devido ao facto de terem provavelmente aumentado a oferta deste tipo de ensaios, o que poderá ter aumentado a concorrência desta área.

De seguida, também foi averiguada a quantidade de ensaios ambientais que foram mais requisitados, tal como se pode observar na Figura 33.

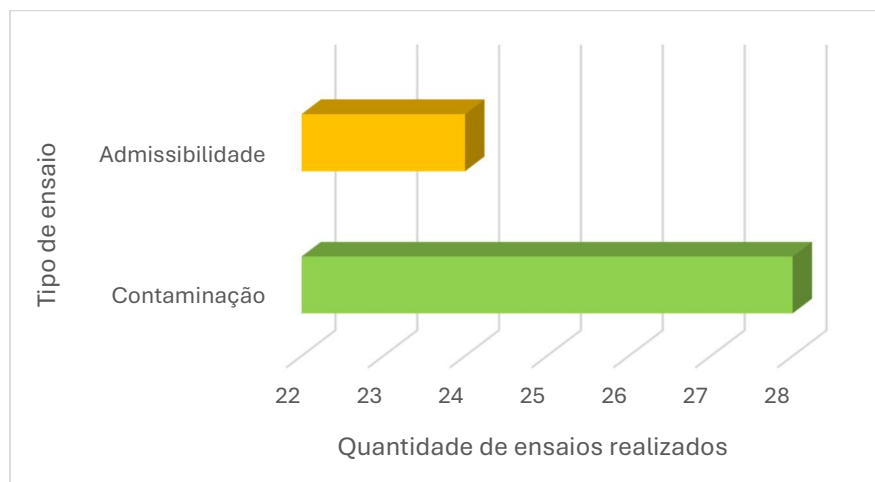


Figura 33 – Gráfico que representa os tipos de ensaios ambientais mais requisitados.

Tal como é possível observar, os ensaios ambientais mais pedidos foram a avaliação da contaminação dos solos, seguindo-se da avaliação da admissibilidade em aterros.

Também foi estudado com maior rigor quais os parâmetros ambientais mais requisitados para ensaios de laboratório, pelo que se destacaram os ensaios para metais, PCBs, eluato, hidrocarbonetos de petróleo, seguidos de BTEX. Para os restantes parâmetros, das obras de prospeção analisadas, estes foram requisitados em menor quantidade nos ensaios laboratoriais, tal como se pode observar na Figura 34.

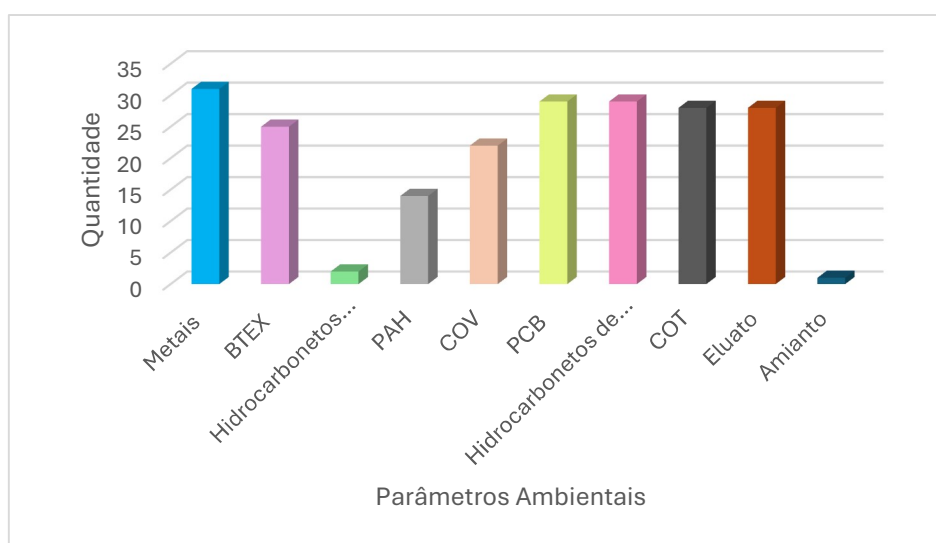


Figura 34 – Gráfico que representa as maiores solicitações para os parâmetros analisados nos ensaios laboratoriais, entre os anos 2020 a 2024.

De acordo com o estudo realizado, os contaminantes mais presentes nos solos e que excederam os Valores de Referência foram o arsénio, cobre, chumbo e mercúrio. Também estiveram presentes em menor quantidade os PCBs, o zinco, o níquel, o vanádio, o cádmio e os TPH (Figura 35).

Como foi referido anteriormente, a presença de arsénio nas formações geológicas em Portugal é muito comum (e.g., Futuro Silva & Fiúza, 2011) levando, por isso, à existência de concentrações de arsénio naturalmente elevadas em relação ao Valor de Referência.

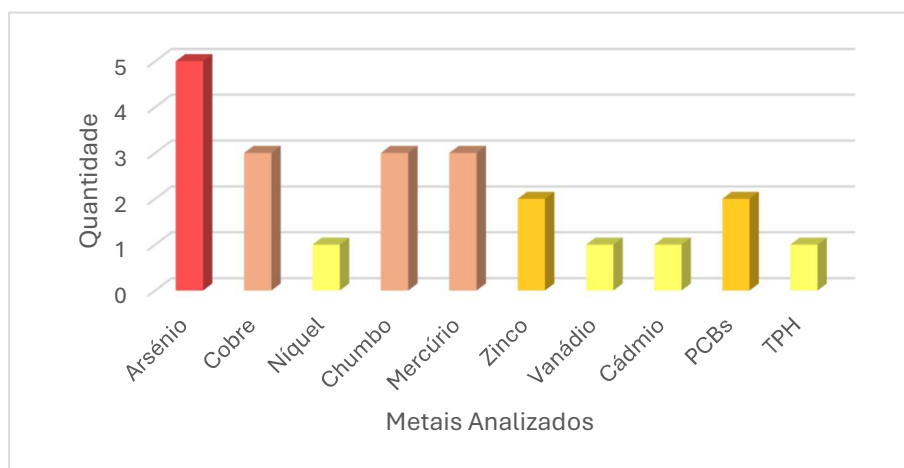


Figura 35 – Gráfico que representa os contaminantes que excederam os respectivos Valores de Referência.

De acordo com o estudo realizado, apenas foram observadas duas obras cujo solo foi considerado como perigoso, pelo que estes terão de ir para aterros de resíduos perigosos. Para uma destas obras, como o local da contaminação é muito pouco, poderá ser retirado apenas o solo desse local e o resto do solo ser considerado para aterros de resíduos inertes. Para maior parte das amostras, os solos tiveram condições para serem considerados em Aterros de Resíduos Inertes, podendo ainda algumas ser levadas para pedreiras ou serem utilizadas noutras obras.

Em ambas as obras onde foi realizado o estudo preliminar não foram identificados indícios da presença atual ou histórica de fontes de contaminação de solos ou águas subterrâneas no local. Assim, não foram recomendadas investigações adicionais para o tema de solos contaminados.

Assim, no decorrer do estudo, verificou-se a importância ambiental e acompanhamento crescente, que destacaram a sua importância como metodologia eficaz e imprescindível na solução dos problemas ambientais e otimização dos processos e sistemas.

Foi notável o crescimento pela procura de ensaios ambientais e laboratoriais, o que gera um impacto positivo tanto para o ambiente, como para a humanidade. Este crescimento também foi dado pela atualização consistente da legislação portuguesa e pela crescente importância a nível europeu da componente ambiental.

Capítulo IV

Caso de Estudo II: Estudo de uma Campanha de Prospeção Geológico – Geotécnica – Desde a Execução em Campo às Análises Ambientais

Rua do Mirador, Ajuda, Lisboa

[página propositadamente em branco]

4. Caso de Estudo II: Estudo de uma Campanha de Prospeção Geológico-Geotécnica – Desde a Execução em Campo às Análises Ambientais

4.1. Considerações Iniciais

Tal como referido no Capítulo I, o presente projeto foi desenvolvido pela Mota-Engil, Engenharia & Construção, S.A. – Departamento de Geotecnia, que permitiu a execução de uma campanha de prospeção geotécnica para identificação e caracterização geotécnica das formações ocorrentes no local destinado à construção de um edifício habitacional, na Rua do Mirador, em Lisboa.

O objetivo desta campanha de prospeção geotécnica, geofísica e ambiental complementar relaciona-se com a modelação geológico-geotécnica das condições associadas ao edifício em questão, bem como a identificação da potencial existência de estruturas enterradas ou cavidades cársticas nos solos.

4.2. Enquadramento

4.2.1. Enquadramento Geográfico

A zona em estudo, que se encontra delineada a vermelho na Figura 36, localiza-se na freguesia de Ajuda, no distrito de Lisboa, mais concretamente na Rua do Mirador.



Figura 36 – Localização geográfica do local em estudo (retirado de Google Earth, em 08/05/2025).

O terreno em estudo apresenta uma forma retangular, com dimensões de aproximadamente 120 m x 45 m com duas zonas distintas divididas por diferentes cotas. A plataforma superior, a norte, contém uma cota de aproximadamente 35 m e é caracterizada pela presença de edifícios em ruínas e zonas de cultivo. Já a plataforma inferior, a sul, contém uma cota de aproximadamente 25 m e engloba uma zona de antigas instalações de oficinas de automóveis em ruínas.

4.2.2. Enquadramento Geológico

De acordo com a folha 34-D Lisboa da Carta Geológica de Portugal (escala 1:50 000), editada pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia – LNEG (*Pais et al., 2005*) e a sua respetiva notícia explicativa (*Pais et al., 2006*), a área em estudo é predominantemente caracterizada por calcários com rudistas (C_{Bi}^2), cujo calcário compacto é preponderante, chegando a ser cristalino com ocorrência de nódulos de sílex, alternando com calcários apinhoados (nodulosos) e calcários com uma componente margosa. Na sua parte superior, a presença de rudistas é predominante, constituindo muitas vezes biostromas, em que os rudistas se encontram maioritariamente silicificados. Para além disso, a região em estudo também se encontra caracterizada pela presença do complexo vulcânico de Lisboa (CVL), com espessuras variáveis, podendo também observar-se unidades sedimentares intercaladas entre as vulcânicas, o que conclui que houve um período de

repouso na atividade magmática durante a qual a sedimentação retomou o seu processamento normal. Também é de elevada importância referir que, na região em estudo, ainda se podem encontrar aluviões e/ou aterros, ocorrentes nas principais linhas de água da área de Lisboa (Vales da ribeira de Algés, de Alcântara, entre outros). A Figura 37 apresenta o enquadramento geológico e localização da obra em estudo, extrato da Carta Geológica à escala 1:50 000, Folha 34-D (Lisboa).

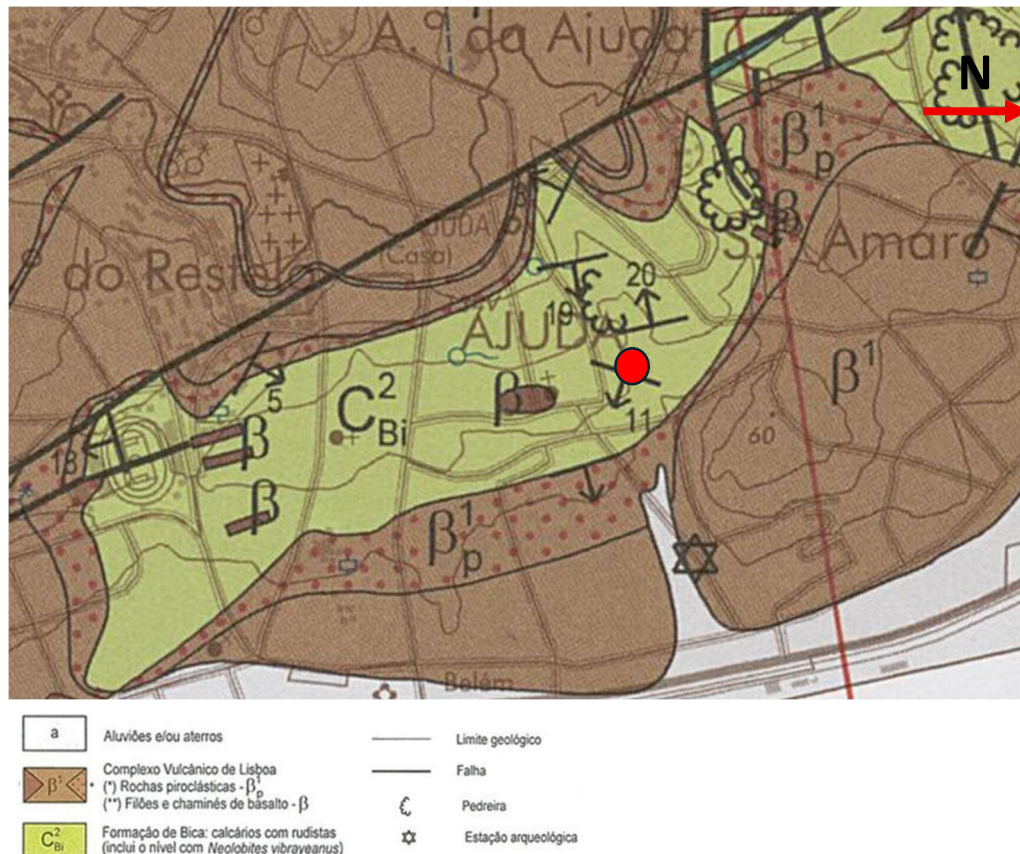


Figura 37 – Representação Geológica do local em estudo, extrato da folha 34-D (Lisboa) da Carta Geológica de Portugal (retirado de geoPortal do LNEG, em 08/05/2024).

4.2.3. Hidrogeologia

À escala regional, podem ser observados diversos tipos de formações hidrogeológicas, que constam na memória descritiva da Carta Geológica de Portugal (34-D), sendo estes:

- Aquíferos, nas formações terrosas superficiais de natureza granular;
- Aquitardos, nas formações terrosas de natureza argilosa;
- Aquicludos/Aquifugos, nas formações rochosas da base.

Do ponto de vista textural, as formações geológicas existentes na zona de estudo configuram os seguintes cenários:

- Permeabilidade tipo poro, ocorrente nas formações terrosas e aterros, cuja permeabilidade resulta da porosidade intergranular;
- Permeabilidade do tipo fissural, ocorrente no maciço calcário, cuja permeabilidade resulta do movimento da água através de fissuras e/ou zonas cársticas.

Na figura 38 é apresentada a carta de riscos hidrogeológicos do Regulamento Municipal de Urbanização e Edificação de Lisboa.

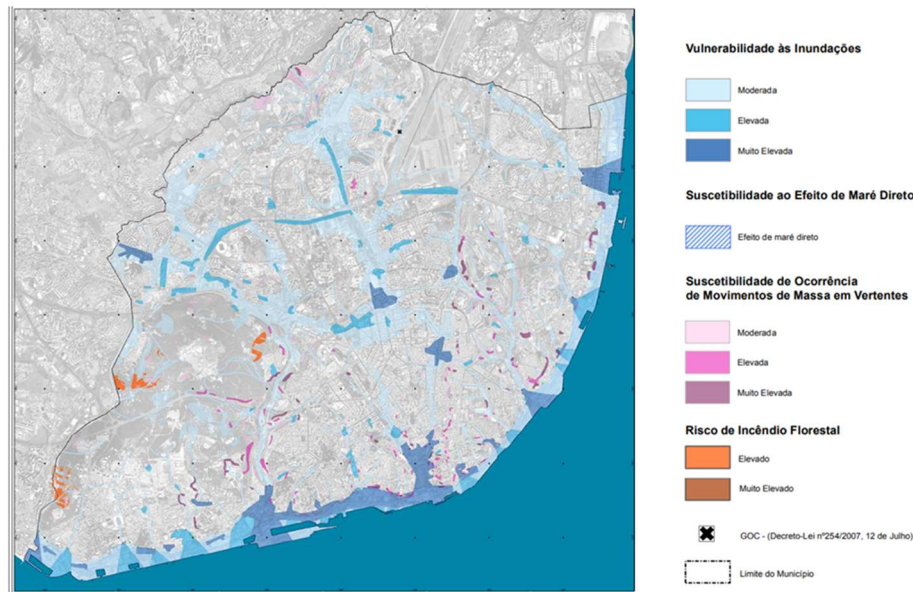


Figura 38 – Carta de riscos hidrogeológicos do Regulamento Municipal de Urbanização e Edificação de Lisboa. (Retirado de: app_bm.download_mny_file).

Para além da campanha de prospeção geotécnica, foram instalados 2 piezómetros, cujas características serão apresentadas mais adiante.

4.3. Prospeção Geológico-Geotécnica *in situ*

Tal como referido anteriormente, a prospeção *in situ* permite a obtenção de dados exatos e aprofundados sobre as condições do subsolo, o que a torna crucial para o planeamento e desenvolvimento de obras seguras e eficientes (Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011). Todos os procedimentos realizados na campanha de prospeção efetuada serão descritos no presente tópico.

De forma a dar início à campanha de prospeção, é necessário garantir a eficácia de alguns fatores importantes, tais como o cumprimento das normas de segurança, a mobilização dos equipamentos a serem utilizados e ainda a garantia de acessos adequados ao local da obra. Também é de grande importância referir que é necessário identificar previamente um local apropriado para recolha de água, de forma a ser possível a realização dos trabalhos de perfuração. Com estes fatores, procede-se à marcação dos pontos específicos de prospeção, de forma a iniciar os trabalhos.

Na execução das sondagens mecânicas foram utilizados os equipamentos hidráulicos de perfuração:

1. MUSTANG A-32 C, da *ATLAS COPCO*;
2. DANDO TERRIER, da *DANDO DRILLING INTERNATIONAL Ltd.*

De forma a realizar a limpeza e arrefecimento das ferramentas de corte, a circulação de água foi realizada com auxílio de um grupo moto-bomba *DITER-FMC L09*, apoiado por outro grupo *HONDA GK 200*.

Posteriormente, ainda foi utilizada uma auto-grua, de forma a posicionar o equipamento de sondagens no patamar superior do terreno.

As Figuras 39A e 39B, apresentadas a seguir, mostram alguns dos equipamentos utilizados na obra.

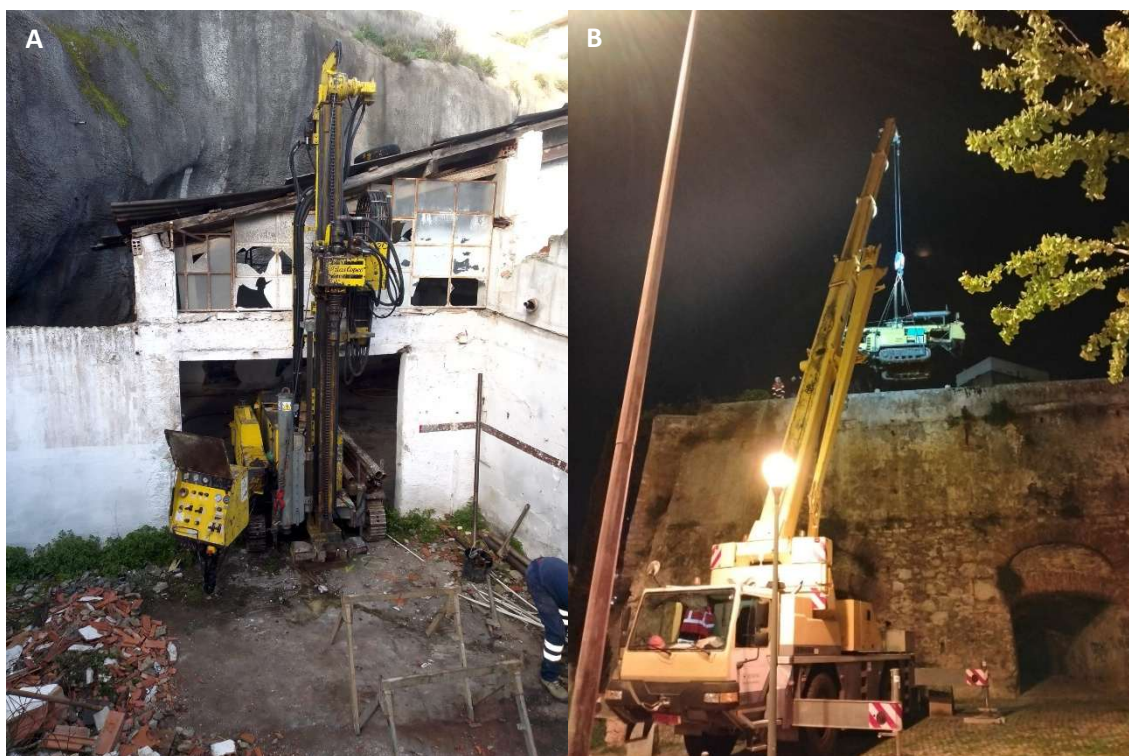


Figura 39 – Aspeto de um dos equipamentos de furação utilizado (Mustang A-32 C) (A) e auto-grua em utilização (B) (Imagens: Cortesia Mota-Engil).

A distribuição e tipo de prospeção utilizadas para o efeito foram definidas pela Mota-Engil, de acordo com o que foi solicitado pelo cliente, constando dos seguintes trabalhos:

- 4 sondagens mecânicas à rotação com amostrador duplo;
- 5 sondagens mecânicas à rotação e com Direct Push;

Engenharia & Construção, S.A. – Departamento de Geotecnia, elaborou um relatório técnico onde consta a documentação completa, juntamente com as condições encontradas, métodos utilizados, análises efetuadas e respetivas conclusões relativas à obra em questão.

Primeiramente, no decurso da prospeção geotécnica, foi realizada uma amostragem contínua, onde foram utilizados amostradores duplos tipo T2 de 86 e 101 mm de diâmetro, equipados com coroas de metal duro (*widia*) na perfuração em solos e coroas diamantadas de matriz variável na perfuração em rocha. As amostras obtidas foram devidamente limpas, armazenadas em caixas adequadas com a indicação das profundidades correspondentes a cada operação e fotografadas individualmente em cada caixa. A Figura 41 apresenta um exemplo das caixas que contém o material recolhido, neste caso referente a uma das sondagens realizadas (S1).



Figura 41 – Exemplo das caixas referentes às amostras de uma sondagem (S1).

As sondagens foram posteriormente dadas como concluídas quando foram cumpridos os requisitos especificados, nomeadamente a obtenção de pelo menos três negas consecutivas no ensaio SPT (NSPT > 60 pancadas), perfuração de 3 m em rocha (no caso do maciço rochoso se encontrar à superfície, terá de furar 6,0 m no mesmo) e atingir simultaneamente profundidade mínima de 19 m.

Para a execução de ensaios laboratoriais solicitados pelo cliente, foram selecionadas amostras das caixas, que foram entregues posteriormente ao laboratório central da Mota-Engil.

Para o controlo do nível freático e recolha de amostras de água subterrânea foram instalados, no interior de dois furos de sondagem, piezómetros em PVC rígido de 2" de diâmetro, montados em séries telescópicas de 3 m de comprimento. Os furos onde foram instalados os piezómetros foram perfurados apenas com água clara e sem adição de adjuvantes para arrefecimento das ferramentas de corte e devidamente limpos no final. A seguinte Figura 42 apresenta um esquema representativo dos piezómetros instalados.

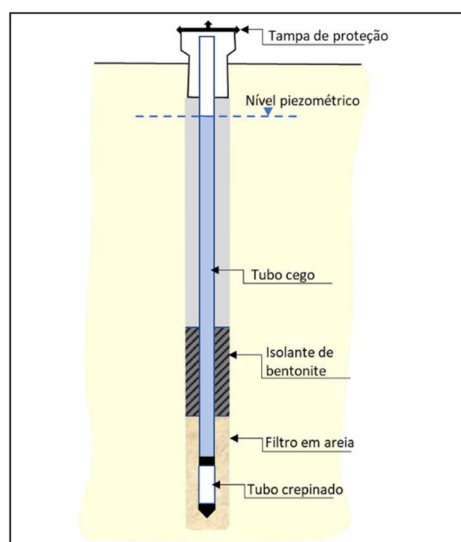


Figura 42 – Esquema representativo dos piezômetros instalados (arquivo Mota-Engil)

Na Tabela 12, são apresentados os resumos das principais características associadas a cada formação encontrada no percurso da prospeção.

Tabela 12 – Resumo da campanha de sondagens.

Formação	Intervalo de profundidade (m)	Descrição Litológica	W	F	RQD (%)	Nível de Água (m)
Cobertura	0,0 - 0,1	Pavimento	-	-	-	5,3 - 10,7
	0,0 - 6,0	Depósitos de aterro heterogêneo	-	-	-	
Formação da Bica		Calcário cristalino e calcário argiloso	W5-2	F5-2	0-94	

Posteriormente, foi possível recorrer ao *software* LogPlot para executar os boletins de sondagem (“log”), o que ajudou a tornar os dados mais acessíveis e compreensíveis. A Figura 43, apresentada a seguir, expõe um exemplo do log da Sondagem 5. Os restantes boletins de sondagem encontram-se apresentados no Anexo I.

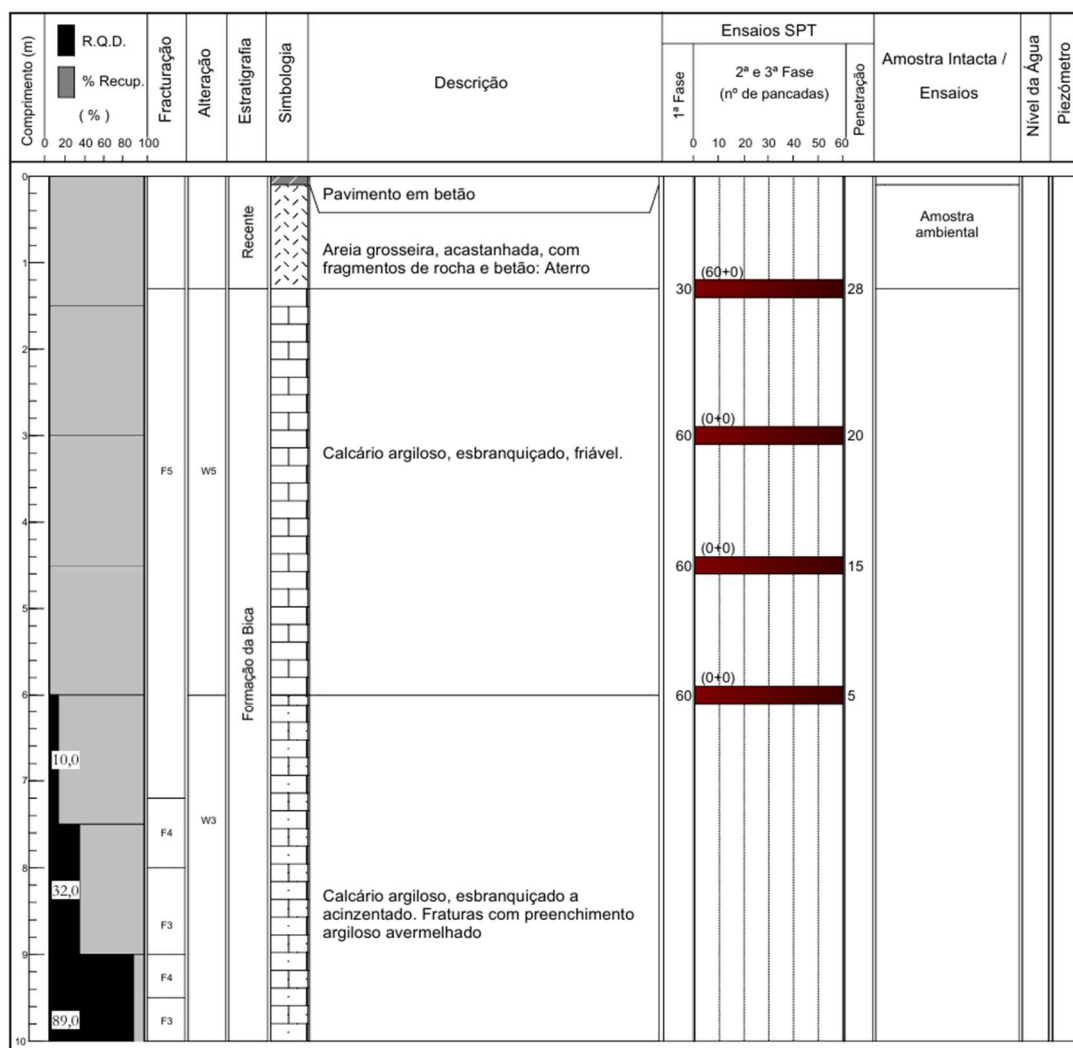


Figura 43 - Exemplo de um boletim de sondagem (log) realizado pela Mota-Engil, Engenharia e Construção, S.A. – Geotecnia (arquivo Mota-Engil).

4.4.1. Ensaio SPT

Após a realização dos ensaios nas diversas sondagens que compõem o presente estudo, foi possível obter os respetivos resultados, como apresentado na Figura 44, sob a forma de perfis de N_{SPT} (todos os solos), N_{60} (solos argilosos) e $(N_1)_{60}$ (solos arenosos).

As amostras recolhidas com o amostrador de Terzaghi foram, no final, condicionadas em embalagens cilíndricas de plástico, corretamente referenciadas.

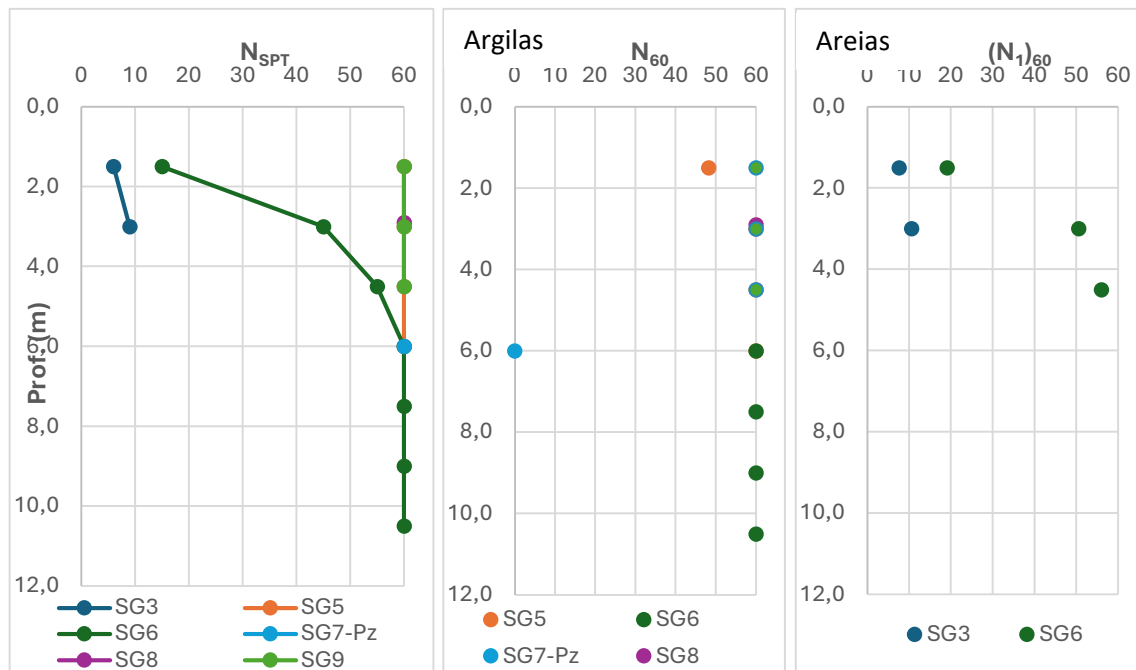


Figura 44 – Resultados dos ensaios SPT com a profundidade.

Assim, foi notável uma unidade superficial de aterro, composta por areias e fragmentos rochosos, que se enquadra no intervalo de compactidade média ($8 < (N_1)_{60} < 25$). Ocorrem frequentemente valores superiores a 50, que deverão corresponder a fragmentos rochosos de calcário, não sendo indicativos da resistência global da camada. Sob esta camada, ainda é possível observar maciço rochoso calcário, que apresenta resistências equivalentes a rochas brandas e francas, com valores característicos de $N_{60} > 60$ e $N_{60} > 60m$, respetivamente.

4.4.2. Ensaios In Situ (Geofísica – Resistividade Elétrica)

Para a realização deste ensaio, foram alocados os seguintes equipamentos e programas informáticos:

- Resistímetro SYSCAL Jr. Switch-48 da *IRIS Instruments*;
- Processamento de dados de resistividade elétrica: Prosys II e Res2Dinv64;
- Informação geográfica: QGIS 3.40;
- Sequência de aquisição: *Wenner-Schlumberger*.

Os perfis de resistividade elétrica foram colocados conforme mostra a Figura 45 (P1 a P5), seguida da Tabela 13 que apresenta vários fatores, tais como número de elétrodo e sentido de aquisição, de cada um dos perfis geoeletricos realizados.

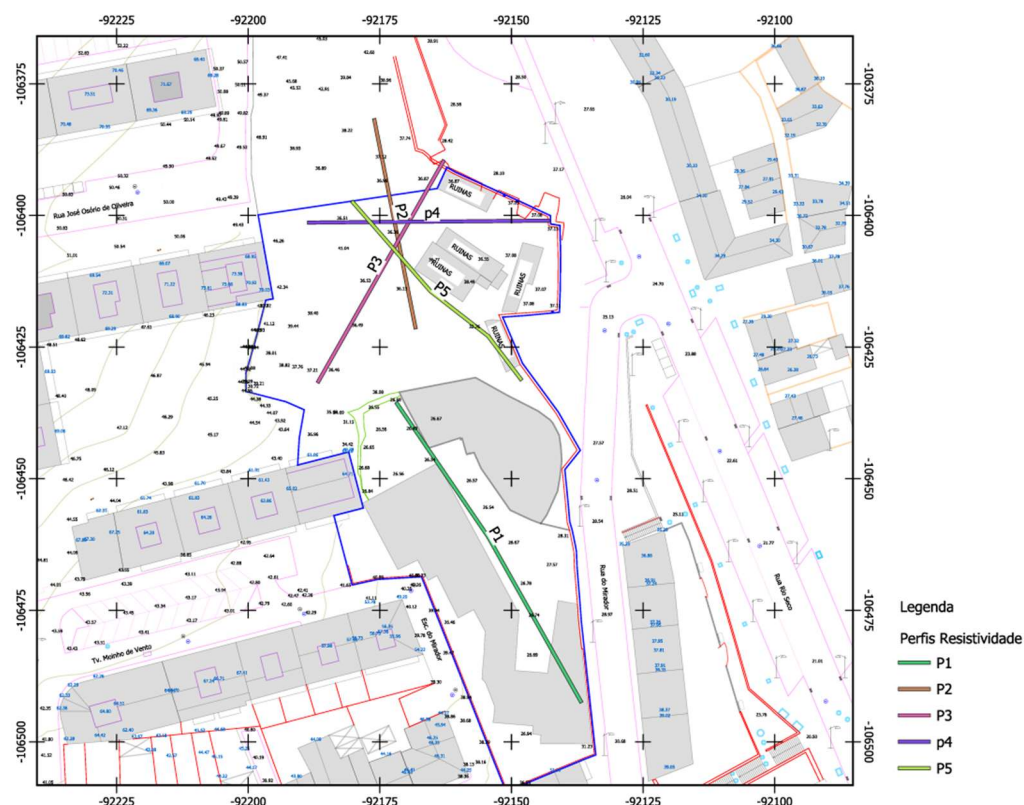


Figura 45 – Localização dos perfis geoeletricos (arquivo Mota-Engil).

Tabela 13 – Parâmetros geométricos da aquisição de cada um dos perfis geoeletricos realizados (arquivo Mota-Engil).

Perfil	Nº de Eléttodos	Comprimento total do perfil (m)	Orientação da aquisição	Espaçamento entre eléttodos (m)
P1	23	66	NW-SE	3
P2	21	40	N-S	2
P3	24	46	NE-SW	2
P4	24	46	E-W	2
P5	24	46	NW-SE	2

Posteriormente, procedeu-se ao processamento de dados, com o objetivo de visualizar e interpretar os valores adquiridos. Inicialmente, recorreu-se à exportação dos dados para formatos adequados ao processamento de dados. Para isso, foi utilizado o programa *PROSYS II*, de forma a converter os dados no formato *Res2dinv*. A topografia também foi inserida ao longo da exportação dos dados. Com isto, os valores de resistividade aparente foram recalculados de acordo com a nova distância entre eléttodos obtida pela topografia irregular do local.

Após a sua conversão, estes dados foram importados no *software Res2Dinv64*, de forma a inverter os dados de resistividade aparente. Através da inversão geofísica, foi utilizado um modelo que forneceu uma resposta semelhante aos valores reais registados em campo.

As Figuras 46 a 50 mostram os resultados dos dados de resistividade aparente registadas em campo, dos perfis P1 a P5, respetivamente. Os erros da inversão de dados mostram um bom ajuste dos mesmos e uma boa fiabilidade dos modelos calculados. Os modelos finais resultantes da inversão foram interpretados e as anomalias relevantes identificadas foram colocadas no programa SIG, de forma a criar mapas interpretativos dos eventos identificados.

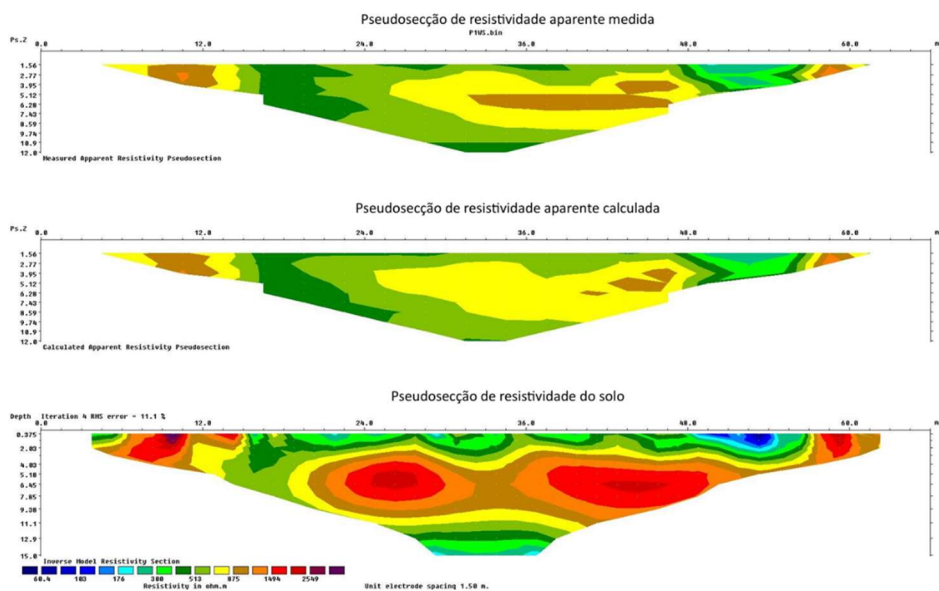


Figura 47 - Perfil de resistividade elétrica para o perfil P1. No topo: Modelo de resistividade aparente registada em campo; no centro: Modelo de resistividades aparentes calculadas; em baixo: Modelo de resistividade resultante da inversão (RMS: 11.1%). (arquivo Mota-Engil)

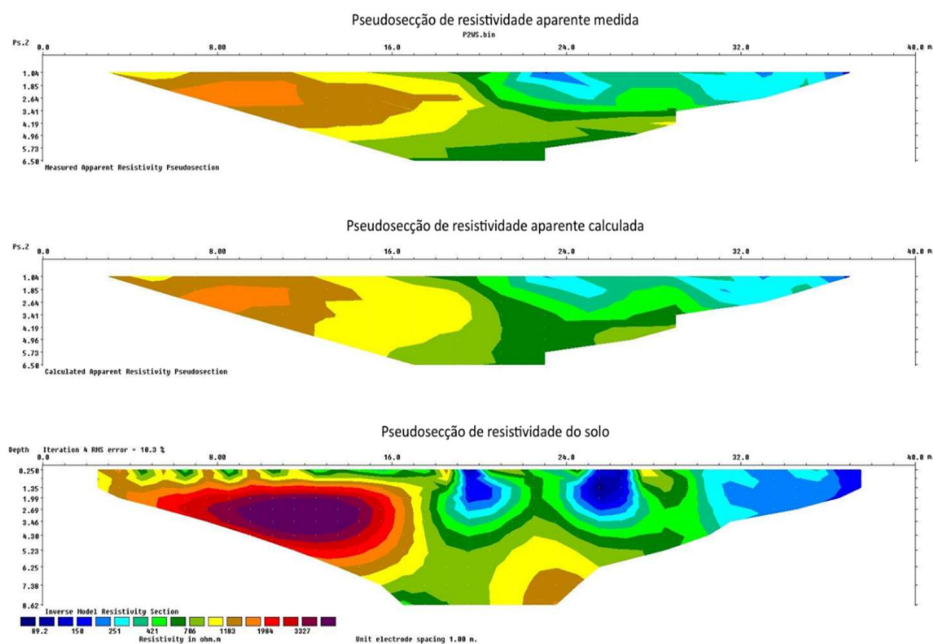


Figura 46 – Perfil de resistividade elétrica para o perfil P2. No topo: Modelo de resistividade aparente registada em campo; no centro: Modelo de resistividades aparentes calculadas; em baixo: Modelo de resistividade resultante da inversão (RMS: 10.3%).

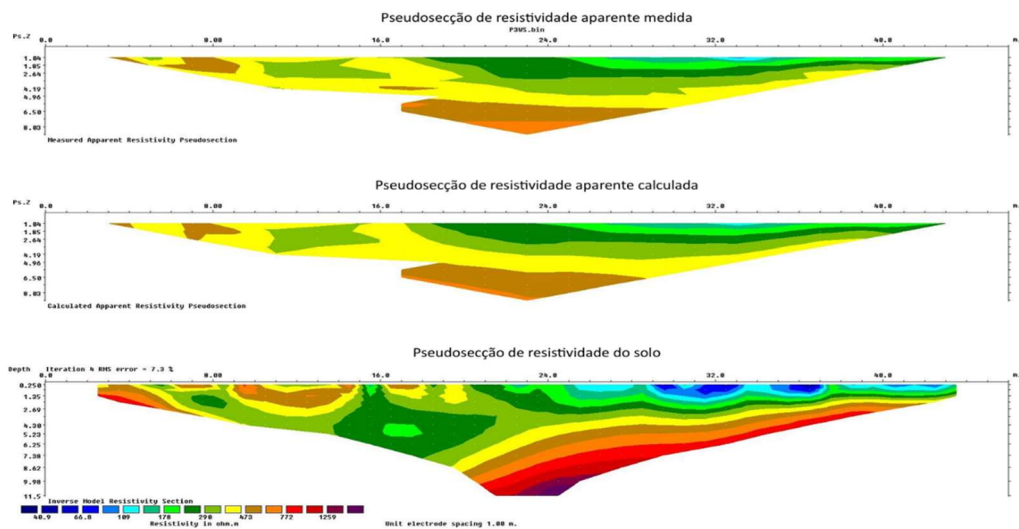


Figura 48 - Perfil de resistividade elétrica para o perfil P3. No topo: Modelo de resistividade aparente registada em campo; no centro: Modelo de resistividades aparentes calculadas; em baixo: Modelo de resistividade resultante da inversão (RMS: 7.3%). (arquivo Mota-Engil)

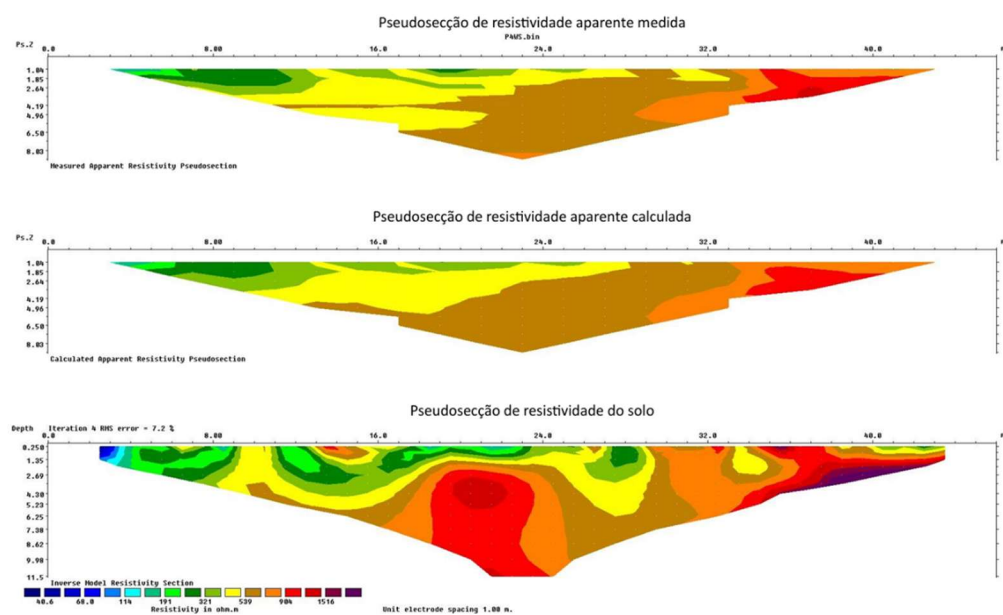


Figura 49 - Perfil de resistividade elétrica para o perfil P4. No topo: Modelo de resistividade aparente registada em campo; no centro: Modelo de resistividades aparentes calculadas; em baixo: Modelo de resistividade resultante da inversão (RMS: 7.2%). (arquivo Mota-Engil)

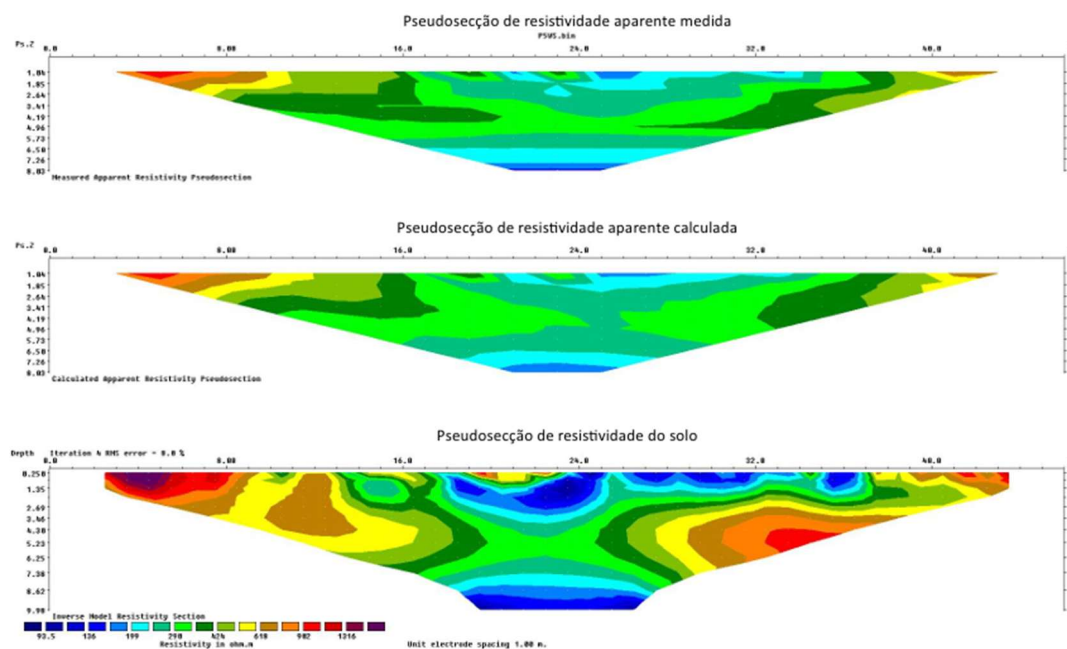


Figura 50 - Perfil de resistividade elétrica para o perfil P5. No topo: Modelo de resistividade aparente registrada em campo; no centro: Modelo de resistividades aparentes calculadas; em baixo: Modelo de resistividade resultante da inversão (RMS: 8.0%). (arquivo Mota-Engil)

Como o maciço rochoso presente na obra possui um grau considerável de fraturação e uma alteração superficial, não é de esperar valores de resistividade bastante elevados, associados a um maciço rochoso competente. Por outro lado, de acordo com a exploração da área como pedreira realizada em situações anteriores, supõe-se a existência de zonas de rocha mais competente em profundidade.

As Figuras 51 a 55 apresentam os resultados da modelação bidimensional dos dados geoeletricos adquiridos ao longo do estudo da obra, cujas cores utilizadas variam uniformemente, de modo a representar, de uma forma mais realista, as características gerais do maciço rochoso em estudo.

Assim, as tonalidades mais quentes correspondem a valores elevados de resistividade elétrica, enquanto os tons mais frios correspondem a valores baixos de resistividade elétrica.

Através da Figura 51 apresentada, para o Perfil P1, observou-se material mais resistente nas porções superficiais das extremidades e na zona central a partir de 1 m de profundidade, sendo interpretado como maciço rochoso fraturado. Foram identificadas anomalias de baixa resistividade, uma interpretada como zona de carsificação preenchida por material menos resistivo (solo), e outra, abaixo dos 14 m, como possível cavidade preenchida por água ou nível freático em maciço fraturado. A presença de água encontra-se relacionada com resistividades inferiores a 100 ohm.m.

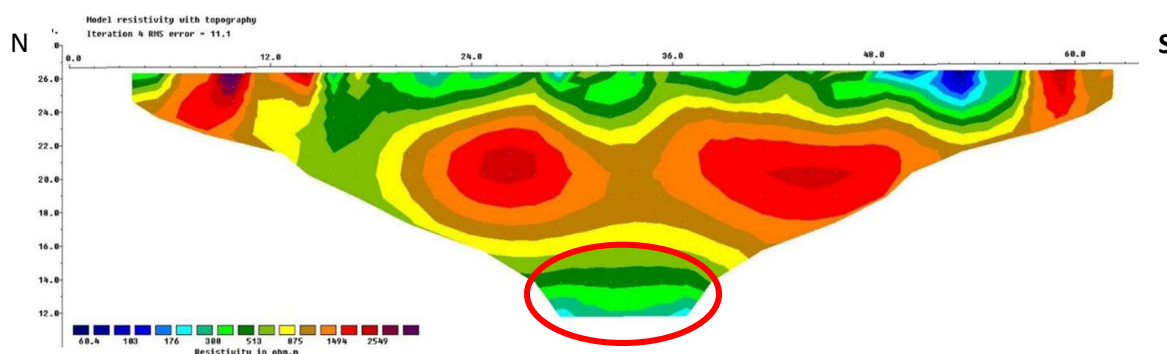


Figura 51 – Resultado e interpretação dos dados do perfil P1. (arquivo Mota-Engil)

Posteriormente, a Figura 52 apresenta a interpretação dos resultados da inversão do perfil geotécnico P2. Neste perfil destacou-se uma anomalia de resistividade a norte, mas que não foi interpretada como cavidade. A sul foi possível observar-se anomalias de baixa resistividade, devido a um possível preenchimento de solo para fins agrícolas. Na porção central, obteve-se uma similaridade com o perfil P1, devido a uma anomalia que poderá representar uma zona de carsificação preenchida.

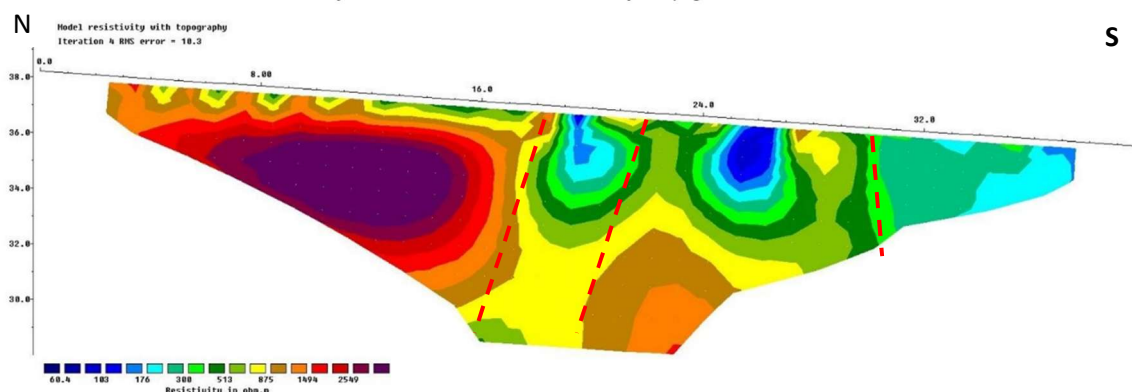


Figura 52 – Resultado e interpretação dos dados do perfil P2. (arquivo Mota-Engil).

A Figura 53 apresenta a interpretação dos resultados da inversão do perfil geoeletrico P3, o qual apresentou baixas resistividades a sudoeste da superfície, que são compatíveis com a existência de solos argilosos com humidade. A partir dos 2 m, foram observados valores elevados e resistividade, que aumentam continuamente com a profundidade. A nordeste, a baixa resistividade em toda a profundidade deve-se, possivelmente, a uma área bastante fraturada ou com carsificação preenchida por solo.

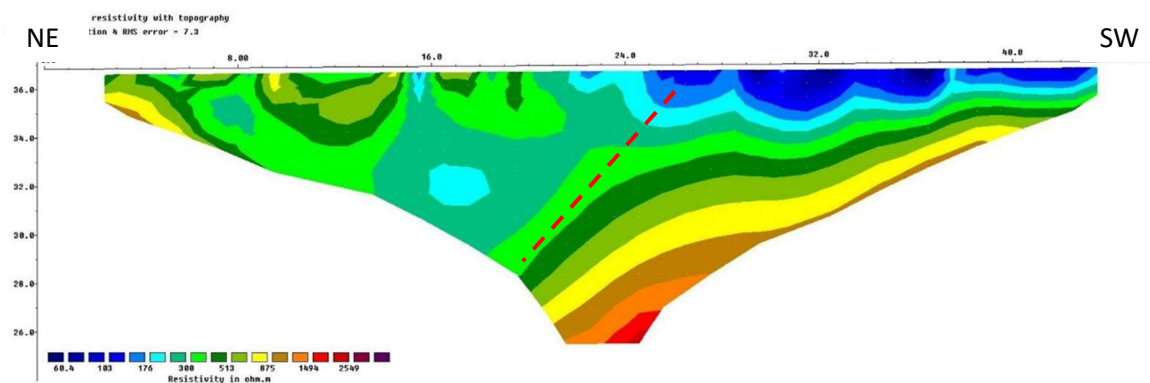


Figura 53 – Resultado e interpretação da inversão dos dados do perfil P3. (arquivo Mota-Engil).

De seguida, foi realizada a interpretação dos resultados da inversão do perfil geoeétrico P4 (Figura 54), onde predominam valores elevados. No entanto, encontra-se uma anomalia de baixa resistividade situada na região central do perfil, que foi interpretada como uma possível zona de fraturação intensa ou cavidade cársica preenchida por material de menor resistividade.

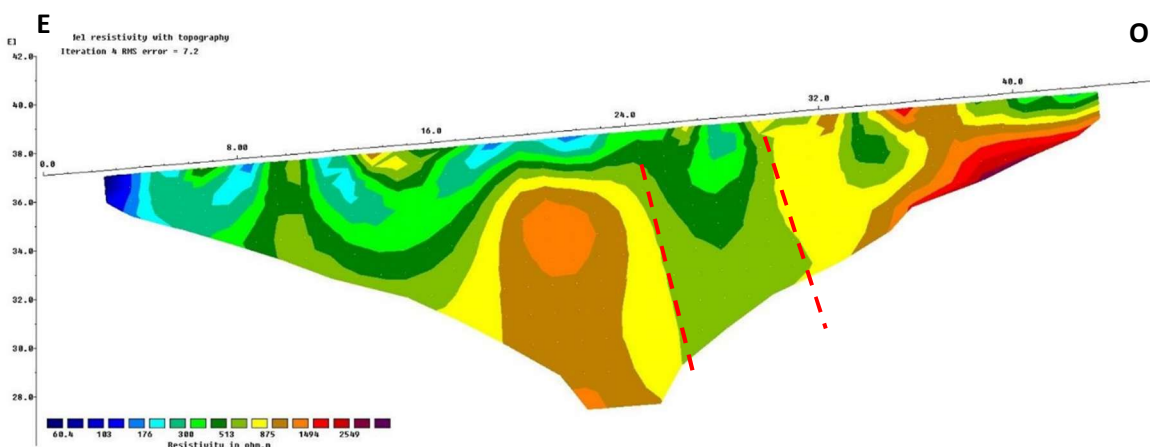


Figura 54 – Resultado e interpretação da inversão dos dados do perfil P4. (arquivo Mota-Engil).

Por fim, na seguinte Figura 55, encontra-se representada a interpretação dos resultados da inversão do perfil geoeétrico P5. Neste perfil, o material mais resistente encontrou-se nas extremidades superficiais. Também foi registada uma anomalia de baixa resistividade na região central que se caracterizou como uma cavidade preenchida por material de alto teor de humidade, o que poderá ser uma estrutura cársica maior em profundidade. Os valores baixos apresentados abaixo dos 27 m poderão indicar a presença de um material condutivo, como água ou solo saturado, a preencher a cavidade.

NW

SE

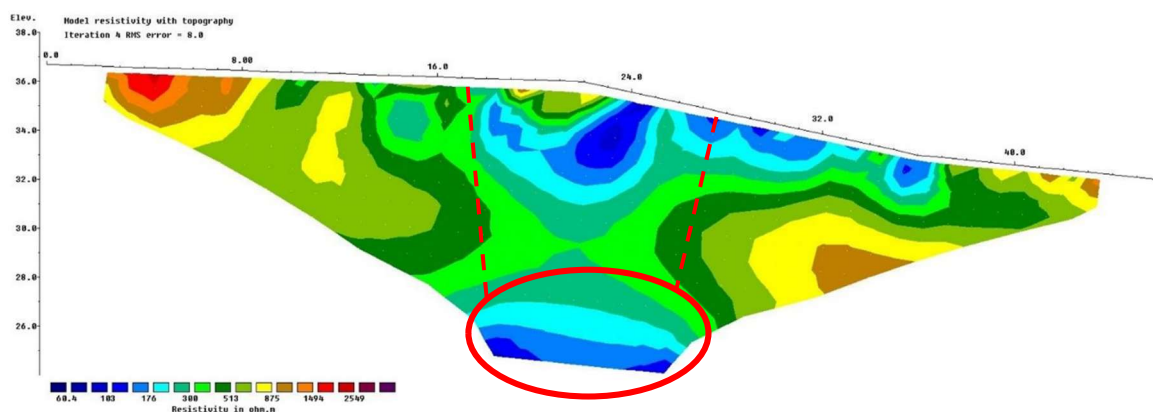


Figura 55 – Resultados e interpretação da inversão dos dados do perfil P5. (arquivo Mota-Engil).

4.4.3. Resultados

Após a utilização do software para os vários perfis já analisados anteriormente, as anomalias foram agrupadas em quatro categorias, sendo denominadas de “A” a “D”.

A Figura 56 apresenta a localização das anomalias identificadas na prospeção.

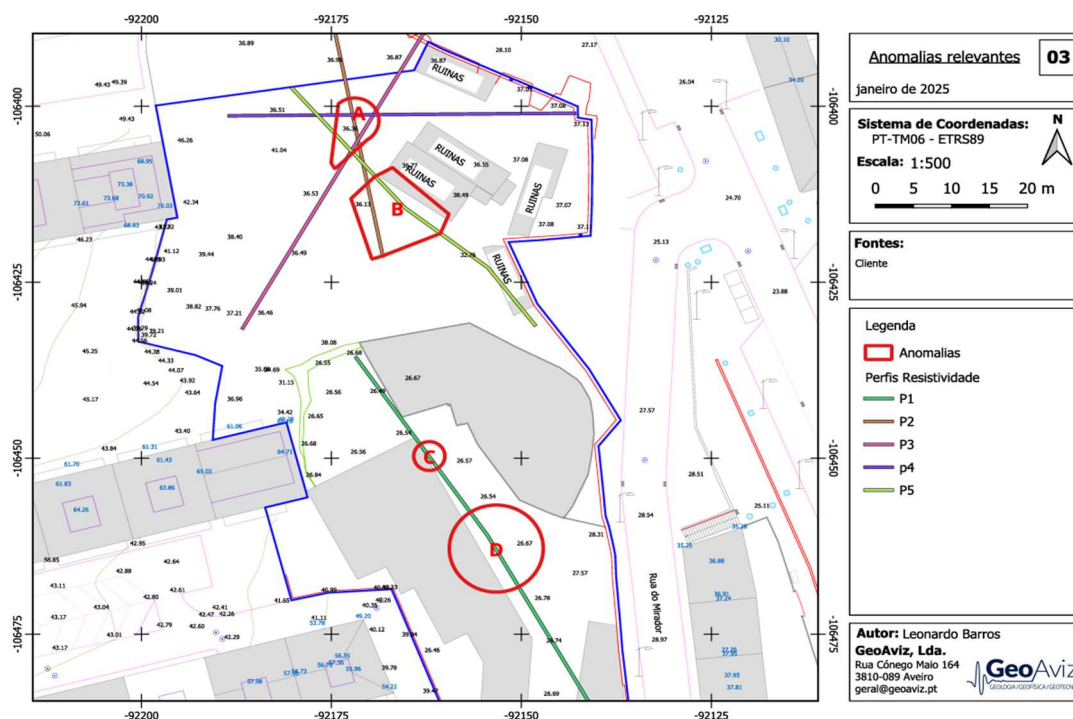


Figura 56 – Localização das anomalias identificadas na prospeção. (arquivo Mota-Engil).

4.4.4. Ensaaios Laboratoriais

Os ensaios laboratoriais realizados na campanha de prospeção do presente caso de estudo permitiram a caracterização das propriedades do solo e da rocha, essenciais para o dimensionamento das estruturas geotécnicas. Assim, para o Edifício na Rua do Mirador, foram incluídos os ensaios laboratoriais para a caracterização física e mecânica dos terrenos e análises químicas à água subterrânea.

a) Solos

Para os ensaios em solos, foram recolhidas três amostras de solos, que posteriormente sofreram análises laboratoriais, com o fim de determinar a percentagem de matéria orgânica. Estes ensaios foram realizados no Laboratório Central da Mota-Engil Engenharia e Construção S.A., de acordo com as especificações do LNEC e o EUROCÓDIGO 7 – Parte 2 “*Geotechnical design assisted by testing: Laboratory testing*”. Os resultados obtidos nestas amostras apresentaram valores que variaram entre os 0,2% e os 1,3% de matéria orgânica (Tabela 14), o que permitiu caracterizar o solo com a presença de areias com cascalho.

Tabela 14 – Resumo dos valores adquiridos dos resultados laboratoriais em solos.

Amostra	Teor em matéria orgânica
	W _{nat} (%)
S1 (0,0-1,5 m)	1,3
S3 (1,5-3,0 m)	0,2
S8 (1,0-2,0 m)	0,1

b) Rochas

Para a realização dos ensaios de resistência à compressão uniaxial, foram utilizadas oito amostras de rocha calcária, adquiridas a partir dos carotes de sondagens, encontrando-se apresentada, na Tabela 15, o resumo dos resultados dos ensaios laboratoriais. Assim, é possível verificar diferentes graus de alteração do calcário (W5 a W2), com uma variação significativa da tensão de rotura (de 8,42 MPa a 82,58 MPa).

Tabela 15 – Resultados dos ensaios laboratoriais em rocha (arquivo Mota-Engil).

Amostra	Proveniência	Litologia/Grau de alteração	Tensão de Rotura, σ_c (MPa)
A3326.24	S2 (7,3-7,5) m	Calcário / W ₂	76,36
A3327.24	S3 (5,0-5,2) m	Calcário / W ₂	82,58
A3328.24	S4 (4,1-4,3) m	Calcário / W ₃₋₄	22,39
A3329.24	S5 (13,5-13,8) m	Calcário / W ₃	58,46
A3330.24	S6 (15,2-15,4) m	Calcário / W ₃₋₄	22,09
A3331.24	S7 (12,5-13) m	Calcário / W ₂₋₃	61,17
A3332.24	S8 (6,5-6,8) m	Calcário / W ₃	34,99
A3333.24	S9 (4,5-4,8) m	Calcário / W ₅	8,42

c) Águas

Foram recolhidas duas amostras de água nos dois piezómetros instalados nos furos de sondagem (correspondentes a SG4-Pz e SG7-Pz). Foram determinados os parâmetros físico-químicos necessários de acordo com o caderno de encargos da empreitada, que determinaram o pH, teor em sulfatos, teor em azoto amoniacal, teor em magnésio e dióxido de carbono agressivo da água (Tabela 16). Foi também calculado o Índice de Langelier (IL) para verificar a agressividade da água ao betão. Assim, determinou-se uma diferença entre os dois pontos de amostragem, como se pode verificar na Tabela 17.

As águas destes dois pontos não apresentaram comportamento químico agressivo, e encontram-se em equilíbrio carbónico.

Tabela 16 – Elementos agressivos presentes nas amostras de água (arquivo Mota-Engil).

Elementos Agressivos	Resultados		Classes de Exposição		
	SG4-Pz	SG7-Pz	XA1	XA2	XA3
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	92	2	[200;600]	]600;300]	]3000;6000]
pH (esc. Sorënsen)	7	7,9	[5,5;6,5[	[4,5;5,5[	[4,0;4,5[
CO ₂ agressivo (mg/l)	<1,0	<1,0	[15;40]	[40;100]	>100
NH ₄ ⁺ (mg)	0,15	0,05	[15;30]	]30;60]	]60;100]
Mg ²⁺ (mg/l)	<10	10	[300;1000]	]1000;3000]	<3000
Soma dos iões agressivos (SO ₄ ²⁻ , NH ₄ ⁺ , Mg ²⁺)	92	42	-	-	-

Tabela 17 – Índices de Langelier (IL) e Ryznar (IR). Os índices de Langelier e Ryznar são usados para avaliar a tendência de corrosão ou incrustação de água em sistemas de água potável e sistemas industriais (arquivo Mota-Engil).

Referência da Amostra	pH	pHS	IL	Comportamento
SG4-Pz	7,4	7,7	-0,3	Equilibrada
SG7-Pz	7,9	7,9	0	Equilibrada

4.4.5. Zonamento Geotécnico

Através dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos que foram realizados, foi possível definir três horizontes geotécnicos (Tabela 18).

Tabela 18 – Ensaios envolvidos na parametrização do zonamento geotécnico (arquivo Mota-Engil).

Zona Geotécnica	Formações	Ensaios Considerados
G ₁	Aterro arenoso medianamente compacto	SPT
G _{2A}	Maciço calcário decomposto a muito alterado (W ₅₋₄)	SPT, GSI
G _{2B}	Maciço calcário medianamente a pouco alterado (W ₃₋₂)	SPT, GSI

4.5. Relatório Geoambiental

4.5.1. Plano de Investigação e de Amostragem de Solos

Para se obter uma boa avaliação da qualidade dos solos da presente obra, foram realizadas vinte sondagens, quinze ambientais e cinco mistas, com recurso a uma sonda de perfuração mecânica. Para a caracterização laboratorial, foram recolhidas quarenta e quatro amostras simples.

A Figura 57 apresenta a localização dos pontos de amostragem, que proporciona uma cobertura bastante abrangente da área de estudo.



Figura 57 – Localização dos pontos de amostragem.

4.5.2. Amostragem dos Solos

De forma a recorrer à recolha das amostras, foram realizadas sondagens mecânicas. A perfuração permitiu recolher as amostras descontaminadas de forma contínua e com alta qualidade. Assim, os liners obtidos foram abertos em campo e permitiram a observação litológica e o processamento das amostras de solo. Através disto, foi escolhido o intervalo de profundidade.

A Figura 58 apresenta o equipamento utilizado para a realização da perfuração, Dando Terrier, que utiliza a técnica de cravação direta em simultâneo com o revestimento.



Figura 58 - Equipamento de furação, Dando Terrier (cortesia: Mota-Engil).

Foram recolhidas quarenta e quatro amostras simples, identificadas de acordo com a referência da sondagem e a profundidade da sua recolha (Figura 59).



Figura 59 - Exemplo de sondagens recolhidas em campo (arquivo: Mota Engil). Neste caso, podem ser observadas as sondagens SA1_010_070 (Recolhida entre os 10 e os 70 cm de profundidade); SA2_010_100 (Recolhida entre os 10 e os 100 cm de profundidade); SA2_100_200 (Recolhida entre os 100 e os 200 cm de profundidade).

4.5.3. Parâmetros Analisados (Solos)

A seguinte Tabela 19 apresenta os parâmetros analisados para cada amostra, de acordo com o documento da APA “Medidas/Recomendações a adotar em matéria de licenciamento, acompanhamento da execução, fiscalização e inspeção de operações urbanísticas – vertentes avaliação e remediação do solo”.

Tabela 19 – Plano analítico.

Matriz	Análises
Solo	Metais (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni; Pb, Zn);
	BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno, Xilenos;
	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH - 16 substâncias individuais);
	COV Organohalogenados;
	Policlorobifenilos (PCB - 7 substâncias individuais)
	Hidrocarbonetos de Petróleo (C5-C10, C10-C16, C16-C35 e C35-C40)
	Carbono Orgânico Total (COT)
Eluato	<u>Parâmetros que constam na Tabela II da Parte B do Anexo II do</u>
	<u>Decreto-Lei n.º 102 D/2020:</u> Metais, cloreto, fluoreto, sulfato, índice de fenol, carbono orgânico dissolvido, sólidos dissolvidos totais.

4.5.4. Investigação

a) Observações de Campo

Tal como referido anteriormente, foram realizadas vinte sondagens para esta campanha, que intersetaram solos de aterro e, em alguns pontos, camadas de cal. Todas as sondagens atingiram a profundidade onde o amostrador não conseguia progredir mais, um ponto referido como “nega”. Assim, concluiu-se que esta profundidade corresponde ao topo do substrato rochoso calcário. Embora em algumas sondagens tenha sido possível recuperar uma pequena parte da amostra deste substrato rochoso, na maioria dos casos a sua posição foi estimada com base nos dados de sondagens geotécnicas realizadas na mesma área ou em locais muito próximos.

A espessura da camada de aterro observada variou significativamente, registando-se valores entre os 0,15 m e os 6,00 m.

Os terrenos da camada de aterro apresentaram alguma heterogeneidade, tanto entre as diferentes sondagens como ao longo da profundidade dentro de uma mesma sondagem. Também foi notada a presença de fragmentos de tijolo e outros pequenos fragmentos de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) incorporados no aterro. Também foram, ocasionalmente, observadas camadas de solo com coloração mais escura.

Não foram identificados quaisquer indícios organoléticos, como cheiros incomuns ou manchas visíveis, que permitissem sugerir a presença de contaminação por hidrocarbonetos de petróleo ou compostos orgânicos voláteis.

b) Resultados Analíticos para Solos

Os resultados analíticos para os solos foram retirados dos boletins analíticos, onde posteriormente foi realizada uma tabela-resumo que compara os resultados obtidos para as amostras simples com os valores de referência e valores limite aplicados, que se encontram de acordo com a formatação sugerida no Guia “Matrizes de Referência para Apresentação dos Resultados Analíticos”, publicado pela APA em outubro de 2020 e com última revisão datada em julho de 2021 (APA, 2021).

c) Avaliação da Contaminação dos Solos

Foram verificados os resultados obtidos para cada substância, incluindo os que excederam os valores de referência para UA (uso agrícola), UU (uso urbano) e UC (uso comercial/industrial).

A Tabela 20 apresenta o resumo da comparação dos valores de referência com os resultados obtidos para as respectivas amostras.

Com isto, foi possível observar valores que excederam os valores de referência para metais, PAH e uma fração de TPH (neste caso a fração C16-C34):

- Para o caso dos metais, existem dezassete amostras na camada de aterro que contém pelo menos um metal que excede o respectivo valor de referência para uso agrícola, doze amostras com pelo menos um metal acima do VR para uso urbano e seis amostras contaminadas com pelo menos um metal com concentração superior acima do VR para uso comercial/industrial;
- No caso dos PAH, foram identificadas três amostras com pelo menos um PAH com concentrações acima dos VR para uso agrícola (sendo que uma delas também acusou VR excedente para o uso urbano para oito PAH e para uso comercial/industrial para sete PAH);
- Por fim, no caso dos TPH, foi apenas detetada uma amostra que excede os VR para uso urbano, na fração C16-C34.

Não foram detetáveis BTEX e COVH, nem valores excedentes de PBC.

Tabela 20 – Resumo dos dados obtidos para a contaminação (Arquivo: Mota-Engil).

Parâmetros	VR - Tab. E UA c/água	VR - Tab. E UA s/água	VR - Tab. E UC s/água	N.º res.	N.º res. < VR UA	N.º res. > VR UA	N.º res. > VR UU	N.º res. > VR UC	LOQ	N.º res. > LOQ	Conc. Mín.	Conc. Máx.
matéria seca (% peso)	-	-	-	44	-	-	-	-	0,01	44	82,7	99
METAIS												
arsénio	11	18	18	44	43	1	0	0	1	28	1	13
cádmio	1	1,2	1,9	44	42	2	1	0	0,1	11	0,1	1,7
chumbo	45	120	120	44	32	12	5	5	0,5	44	0,6	290
cobre	140	140	230	44	42	2	2	1	0,2	44	0,3	1700
crômio	160	160	160	44	44	0	0	0	0,2	44	1,1	74
mercúrio	0,25	0,27	3,9	44	35	9	9	0	0,05	18	0,06	1,03
níquel	100	100	270	44	44	0	0	0	0,5	44	0,9	63
zinco	340	340	340	44	42	2	2	2	1	44	1,1	1000
PAH												
naftaleno	0,6	0,6	9,6	44	44	0	0	0	0,05	1	0,25	0,25
acenaftileno	0,15	0,15	0,15	44	44	0	0	0	0,05	0	<LOQ	<LOQ
acenafteno	7,9	7,9	96	44	44	0	0	0	0,05	1	0,059	0,059
fluoreno	62	62	62	44	44	0	0	0	0,05	1	0,23	0,23
fenantreno	6,2	6,2	12	44	44	0	0	0	0,05	4	0,054	2
antraceno	0,67	0,67	0,67	44	43	1	1	1	0,05	1	1,1	1,1
fluoranteno	0,69	0,69	9,6	44	43	1	1	0	0,05	11	0,071	5,5
pireno	78	78	96	44	44	0	0	0	0,05	12	0,066	4,4
benzo(a)antraceno	0,5	0,5	0,96	44	43	1	1	1	0,05	5	0,056	2,9
criseno	7	7	9,6	44	44	0	0	0	0,05	5	0,058	2,3
benzo(b)fluoranteno	0,78	0,78	0,96	44	43	1	1	1	0,05	7	0,061	2,9
benzo(k)fluoranteno	0,78	0,78	0,96	44	43	1	1	1	0,05	2	0,1	1,5
benzo(a)pireno	0,078	0,3	0,3	44	41	3	1	1	0,05	8	0,056	3,5
dibenz(a,h)antraceno	0,1	0,1	0,1	44	43	1	1	1	0,05	1	0,27	0,27
benzo(ghi)perileno	6,6	6,6	9,6	44	44	0	0	0	0,05	5	0,057	2,4
indeno(1,2,3-cd)pireno	0,38	0,38	0,76	44	43	1	1	1	0,05	7	0,063	2,6
PAH (EPA, 16) soma	-	-	-	44	-	-	-	-	-	-	0,137	31,91
COV AROMÁTICO												
benzeno	0,17	0,17	0,32	44	44	0	0	0	0,02	0	<LOQ	<LOQ
tolueno	2,3	2,3	68	44	44	0	0	0	0,05	0	<LOQ	<LOQ
etilbenzeno	1,1	2	9,5	44	44	0	0	0	0,05	0	<LOQ	<LOQ
para e meta xileno	-	-	-	44	-	-	-	-	0,1	0	<LOQ	<LOQ
o-xileno	-	-	-	44	-	-	-	-	0,05	0	<LOQ	<LOQ
Soma xilenos	3,1	3,1	26	44	44	0	0	0	-	-	<LOQ	<LOQ
COV ORGANOHALOGENADOS												
1,1,2,2-Tetracloretoano	0,05	0,05	0,05	44	44	0	0	0	0,02	0	<LOQ	<LOQ
1,1-dicloroetano	0,47	3,5	17	44	44	0	0	0	0,04	0	<LOQ	<LOQ
cloroeto de vinilo	0,02	0,02	0,032	44	44	0	0	0	0,01	0	<LOQ	<LOQ
diclorometano	0,1	0,1	1,6	44	44	0	0	0	0,05	0	<LOQ	<LOQ
clorofórmio (triclorometano)	0,05	0,05	0,18	44	44	0	0	0	0,02	0	<LOQ	<LOQ
tetracloreto de carbono (tetracloro)	0,05	0,05	0,21	44	44	0	0	0	0,05	0	<LOQ	<LOQ
tricloroetano	0,061	0,061	0,61	44	44	0	0	0	0,05	0	<LOQ	<LOQ
tetracloroetano	0,28	0,28	4,5	44	44	0	0	0	0,05	0	<LOQ	<LOQ
1,1,1-tricloroetano	0,38	0,38	6,1	44	44	0	0	0	0,05	0	<LOQ	<LOQ
1,1,2-tricloroetano	0,05	0,05	0,05	44	44	0	0	0	0,05	0	<LOQ	<LOQ
1,2-dicloroetano	0,05	0,05	0,05	44	44	0	0	0	0,05	0	<LOQ	<LOQ
1,1-dicloroetano	0,05	0,05	0,064	44	44	0	0	0	0,01	0	<LOQ	<LOQ
cis-1,2-dicloroetano	1,9	3,4	37	44	44	0	0	0	0,025	0	<LOQ	<LOQ
trans-1,2-dicloroetano	0,084	0,084	1,3	44	44	0	0	0	0,025	0	<LOQ	<LOQ
soma cis/trans-1,2-dicloroetano	-	-	-	44	-	-	-	-	-	0	<LOQ	<LOQ
1,2-dicloropropano	0,05	0,05	0,16	44	44	0	0	0	0,05	0	<LOQ	<LOQ
soma cis/trans-1,3-dicloropropano	0,05	0,05	0,18	44	44	0	0	0	-	-	<LOQ	<LOQ
cis-1,3-dicloropropano	-	-	-	44	-	-	-	-	0,05	0	<LOQ	<LOQ
trans-1,3-dicloropropano	-	-	-	44	-	-	-	-	0,05	0	<LOQ	<LOQ
1,1,1,2-tetracloroetano	0,05	0,05	0,09	44	44	0	0	0	0,05	0	<LOQ	<LOQ
bromofórmio (tribromometano)	0,26	0,26	0,61	44	44	0	0	0	0,1	0	<LOQ	<LOQ
HIDROCARBONETOS												
VPH >C6-C10	55	55	55	44	44	0	0	0	-	1	0,8	0,8
C10-C16	98	98	230	44	44	0	0	0	8	0	<LOQ	<LOQ
C16-C34	300	300	1700	44	43	1	1	0	6	15	7,7	520
C34-C40	2800	2800	3300	44	44	0	0	0	4	9	4,7	66
C10-C40	-	-	-	44	-	-	-	-	20	9	27	590
POLICLOROBIFENILOS (PCB)												
Soma 7 PCB	0,35	0,35	1,1	44	44	0	0	0	-	-	0,001	0,046

d) Avaliação da perigosidade dos solos

Para a avaliação da perigosidade dos solos, observara-se as substâncias consideradas relevantes, denominadas por COC (*Contaminants of Concern*), que caracterizam as substâncias que são detetadas com pelo menos uma amostra com concentrações acima do respetivo VR.

As substâncias identificadas como COC para uso urbano para a presente obra foram identificadas por:

- Metais – Cádmiu, chumbo, cobre, mercúrio e zinco;
- PAH – Antraceno, fluoranteno, benzo(a)antraceno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno, benzo(a)pireno, dibenz(a,h)antraceno e indeno(1,2,3-cd)pireno.

Assim, foi possível verificar que a amostra SA9_010_100 caracteriza-se como Resíduo Perigoso, dado a sua excedência de cobre e zinco, que pelo método da soma apresenta uma característica de perigosidade de HP14 (Ecotóxico).

e) Avaliação da admissibilidade dos solos em Aterro

Foi realizada uma tabela com o resumo dos dados obtidos para os parâmetros da admissibilidade dos solos em aterro, com o cumprimento das Tabelas 2 e 3 do Anexo II, Parte B do RJDR, constantes no RGGR do DL 102-D/2020, de 10 de dezembro, na sua versão mais atualizada (DL n.º 11/2023, de 10 de fevereiro).

Assim, foi possível verificar que, das quarenta e quatro amostras analisadas, dezasseis destas não são admissíveis para ARI. No entanto, as mesmas são admissíveis em ARNP, por não ultrapassarem os valores estabelecidos por lei para esta classe de aterro.

Ainda é possível verificar que doze amostras foram classificadas como “contaminadas”, voltando a ser apenas admissíveis em ARNP.

Através desta análise, é possível concluir que apenas vinte e sete amostras estão aptas para ser enviadas para ARI. Vinte e três amostras poderão ser enviadas para recuperação ambiental de pedreiras (vazadouros), visto cumprirem os VR para UA e VL para ARI.

f) Polígonos de Thiessen

De forma a delimitar as áreas que excedem os VR e estimar os respectivos volumes, foi utilizado o método de polígonos de Thiessen, que criou as áreas de influência a partir de cada ponto de amostragem, assumindo que a concentração de uma dada substância é uniforme em toda a área do polígono correspondente.

Assim, através do produto da espessura da coluna de solos contaminados de cada sondagem e a área do respetivo polígono de Thiessen, foi criada a estimativa do volume de solos contaminados presente no local em estudo.

A seguinte Tabela 21 apresenta as classes associadas à estimativa de volumes, de acordo com os possíveis destinos para os solos escavados.

Tabela 21 – Classes associadas à estimativa de volumes (dados: Arquivo Mota-Engil).

Destino Final Possível	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
Recuperação Pedreira	x					
Utilização numa obra com Uso Urbano	x	x	x			
Utilização numa obra com Uso Comercial	x	x	x	x		
Reutilização na mesma obra	x	x	x			
Aterros Resíduos Inertes (ARI)	x		x			
Valorização em Cimenteira	x	x	x	x	x	
Aterro Resíduos Não Perigosos (ARNP)	x	x	x	x	x	
Aterro Resíduos Perigosos (ARP)						x

Legenda:

Classe 1: Todos os parâmetros cumprem os respetivos VR para UA, UU e UC e cumprem todos os VL para ARI

Classe 2: Todos os parâmetros cumprem os respetivos VR para todos os usos considerados, mas não cumprem todos os VL para a Tabela 2 (eluato).

Classe 3: Um ou mais parâmetros não cumprem os respetivos VR para UA, mas cumprem os VR para UU e UC; todos os VLs para ARI são cumpridos.

Classe 4: Um ou mais parâmetros não cumprem os respetivos VR para UU, mas cumprem os VR para UC e VL da Tabela 4.

Classe 5: Um ou mais parâmetros não cumprem os respetivos VR para UC, o solo é Resíduo Não Perigoso e todos os VL para a Tabela 4 são cu.

Um ou mais parâmetros não cumprem os VR para UC, considerando-se assim Resíduo Perigoso.

No entanto, uma vez que cumpre o VL da Tabela 4, também cumpre o VL para a Tabela 8 para admissibilidade em ARP.

Para o Patamar A (nível inferior da obra), foram caracterizados 3,517 m³ de solos. A Figura 60 apresenta os polígonos com as respectivas manchas de contaminação e volumes associados para uso urbano.

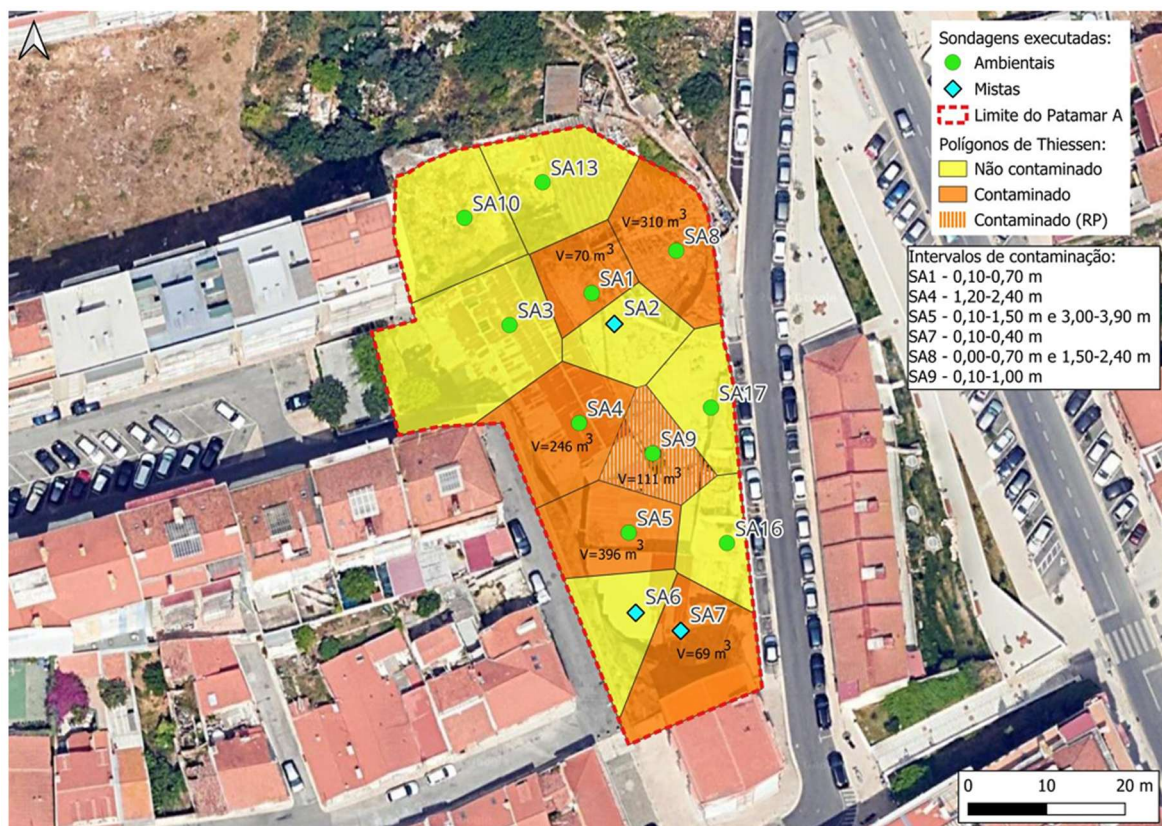


Figura 60 – Polígonos de Thiessen, manchas de contaminação e volumes de solos contaminados para o Patamar A.

Posteriormente, foi realizado o mesmo método para o Patamar B (nível superior da obra). Para este, foram abordados dois cenários diferentes: o primeiro com a inclusão da sondagem SA14 como não contaminada, visto que estava presente substrato rochoso à superfície, e o segundo não considerando a execução desta sondagem.

Assim, a Figura 61 representa o primeiro cenário, enquanto a Figura 62 apresenta o segundo cenário.

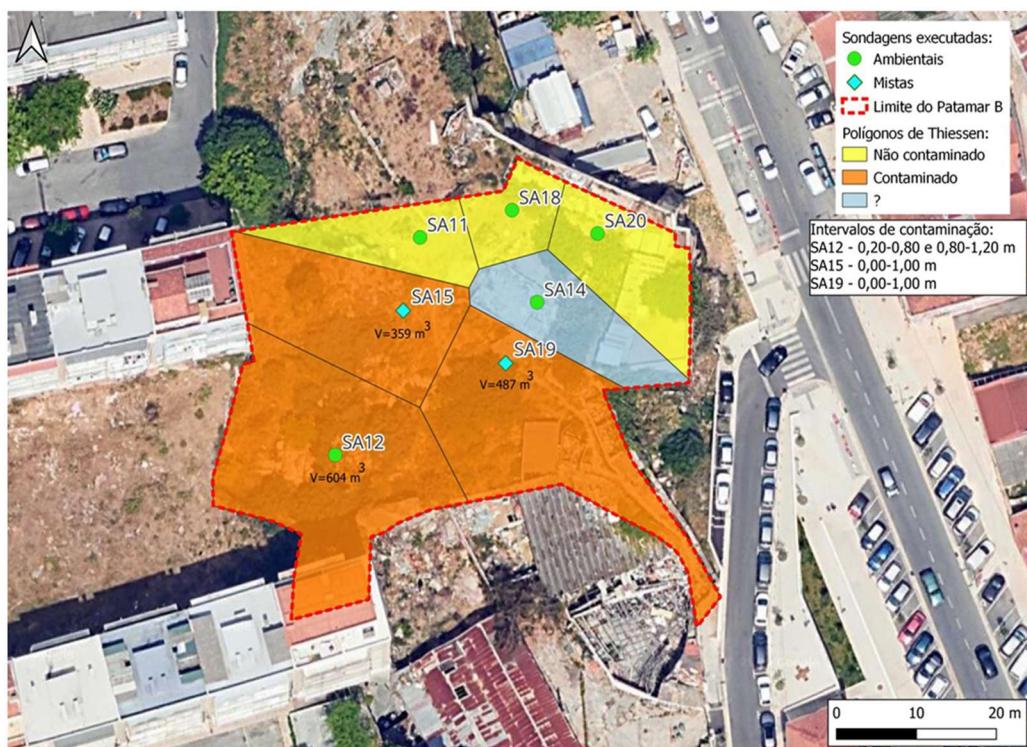


Figura 61 - Polígonos de Thiessen, manchas de contaminação e respectivos volumes do Patamar B, com sondagem SA14.

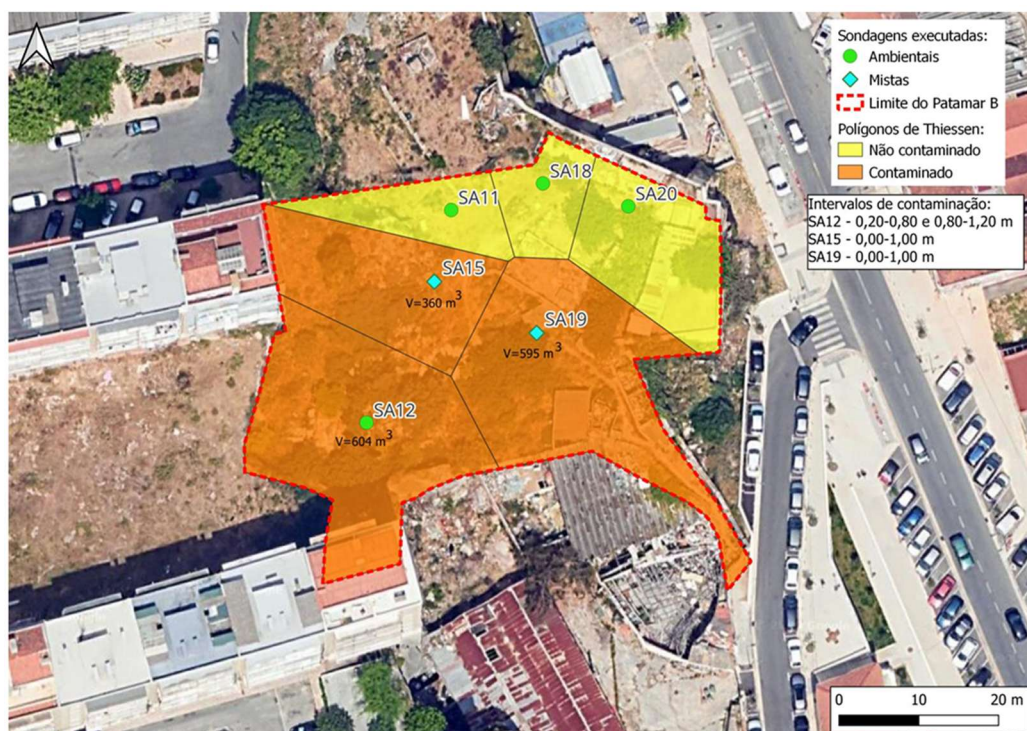


Figura 62 - Polígonos de Thiessen, manchas de contaminação e volumes de solos contaminados (UU) para o Patamar B, com exclusão da sondagem SA14.

g) Resíduos Resultantes da Operação

Devido à realização de escavações no solo, foram gerados resíduos (principalmente de solos e rochas).

A Tabela 22 apresentada demonstra que, de acordo com a avaliação química das amostras analisadas e de acordo com a LER, publicada pela Decisão 2014/955/EU, da Comissão, de 18 de dezembro, estes resíduos podem ser classificados com o código LER 17 05 04: Solos e rochas não abrangidos em 17 05 03.

Tabela 22 – Resumo dos volumes e massas das diferentes tipologias de resíduos a produzir assumindo que todos os solos caracterizados sejam removidos do local (dados: Arquivo Mota-Engil).

Descrição	Tipologia	Código LER	Volume (m3)	Massa (ton)	Operação de Gestão de Resíduos no Local da Obra	Operação de Gestão de Resíduos no Destino Final	Destinos Finais Possíveis
Solos não contaminados caracterizados - Resíduos a Remover	Solos não perigosos com concentrações abaixo dos VR para Uso Urbano (não contaminado) - com SA14	17 05 04	4,23	7,614	R12 ou D13	D1, R5 ou R10	Reutilização na própria obra, reutilização noutra obra como subproduto (R10), reutilização no enchimento de vazios de escavação, noeadamente pedreiras cujo Plano Ambiental e Recuperação Paisagística (PARP) (R10) que autorize a utilização de resíduos com código LER 17 05 04 (R5) ou Deposição em Aterro de Resíduos Inertes (D1), com a condição de cumprirem os critérios para cada destino final.
	Solos não perigosos com concentrações abaixo dos VR para Uso Urbano (não contaminado) - sem SA14	17 05 04	4,887	8,797			
Solos contaminados caracterizados - Resíduos a remover	Solos não perigosos com concentrações acima dos VR para Uso Urbano (contaminado) - com SA14	17 05 04	1,365	2,457	R12 ou D13	R5 ou D1	Valorização em Cimenteira (R5) ou Deposição em ARNP (D1)
	Solos não perigosos com concentrações acima dos VR para Uso Urbano (contaminado) - sem SA14	17 05 04	1,473	2,651			
	Solos classificados como resíduos perigosos com concentrações acima dos VR para Uso Urbano	17 05 03	111	200	D13	D1	ARP (D1)

Assim, considerou-se uma massa volúmica de 1,8 t/m³ dos materiais a escavar.

4.6. Breve Análise e Discussão dos Resultados

O presente relatório permitiu o estudo geotécnico e geoambiental levado a cabo na Rua do Mirador, Lisboa.

Para se proceder à caracterização do local, foram realizadas sondagens mecânicas à rotação, sondagens mecânicas ambientais, ensaios de penetração dinâmica, instalação de piezómetros, perfis de resistividade elétrica, ensaios laboratoriais e análises químicas à água subterrânea. No relatório geotécnico, o solo foi caracterizado como composto por areias e fragmentos rochosos, sendo que ainda foi observada a existência de um maciço rochoso calcário, com resistências

equivalentes a rochas brandas e fracas. Posteriormente, os resultados dos ensaios de resistividade elétrica demonstraram a existência de quatro anomalias, sendo estas caracterizadas por:

- Anomalia A: Cavidades preenchidas por material terroso, identificadas em múltiplos perfis;
- Anomalia B: Zonas extensas de carsificação com material húmido;
- Anomalia C: Pequenas cavidades com extensão lateral incerta;
- Anomalia D: Possível cavidade ou nível freático em profundidade, com extensão lateral desconhecida.

Os ensaios ambientais também permitiram uma melhor caracterização do solo, onde foram analisadas quarenta e quatro amostras. De acordo com os boletins analíticos obtidos e estudo das componentes de cada amostra, foram registadas excedências em metais, PAH e uma excedência para TPH na fração C16-C34. Os metais como o chumbo e o mercúrio foram os principais contaminantes acima dos valores de referência para Uso Urbano (UU).

A classificação de perigosidade dos solos escavados identificou a amostra SA9_010_100 como Resíduo Perigoso (pelo código LER 17 05 03), devido à característica de perigosidade HP14 (ecotoxicidade), associada às concentrações de óxidos de cobre e de zinco presentes nesta amostra. As restantes amostras que excederam os valores de referência para Uso Urbano foram consideradas Resíduos Não Perigosos (pelo código LER 17 05 04).

A estimativa preliminar dos volumes dos solos caracterizados, considerando a escavação de toda a área, é de aproximadamente 9,238 m³ (cenário com a amostra SA14) ou 10,330 m³ (cenário sem a amostra SA14). Deste total, cerca de 1,365 a 1,473 m³ são de solos contaminados não perigosos, enquanto cerca de 111 m³ de volume correspondem a resíduo perigoso.

[página propositadamente em branco]

Capítulo V

Considerações Finais

[página propositadamente em branco]

5. Considerações Finais

A presente dissertação explorou o crescimento da componente ambiental nas obras geotécnicas, bem como uma síntese da análise de duas campanhas de prospeção geotécnica e geoambiental, de forma a alertar o leitor para a importância que o ambiente possui na geotecnia. Os objetivos principais deste trabalho incluíram evidenciar a crescente importância da componente ambiental, analisar o aumento da procura por campanhas ambientais e determinar a evolução e interpretar os principais resultados.

A utilização da plataforma “GIS MEEC” da Mota-Engil foi imprescindível para o primeiro caso de estudo. Esta plataforma é muito útil na engenharia geotécnica, pois permite a todos os técnicos acederem às respetivas obras em tempo real, permitindo a fácil comunicação e interação com os dados geoespaciais. Com a utilização deste *software*, foi possível aceder às obras geotécnicas ocorridas entre os anos de 2020 a 2024. Assim, primeiramente foi realizada uma análise à solicitação dos clientes para a concretização de campanhas de prospeção em parceria com a Mota-Engil Engenharia & Construção, S.A., onde se verificou um aumento nesta procura, com uma média de 76 propostas comerciais por ano, indicando uma tendência de crescimento que se espera manter em 2025. No entanto, no ano de 2024 houve uma ligeira descida nas solicitações, o que poderá ter sido provocado pelo facto de a empresa (ou, até mesmo, o próprio país) estar a atingir uma média ou patamar no número de obras. Posteriormente também foi observada, para estas mesmas campanhas de prospeção, a quantidade de solicitações de prospeções geoambientais e a sua comparação com as prospeções geoambientais com solicitação de ensaios laboratoriais realizadas, onde se voltou a ter um gráfico idêntico ao anterior, com um crescimento entre 2020 e 2023 e uma ligeira descida no ano de 2024. Este crescimento também foi resultado da atualização consistente da legislação portuguesa e pela crescente importância a nível europeu da componente ambiental. Visto que foram solicitadas menos campanhas de prospeção para 2024, também

diminuíram as solicitações para a realização de ensaios geoambientais. Contudo, é estimado um novo aumento para 2025, o que irá confirmar com mais pormenor a crescente solicitação ambiental na geotecnia.

Uma possível explicação para os resultados obtidos nos gráficos apresentados foi a possibilidade de a empresa se encontrar a atingir uma média de propostas de prospeção ambiental, uma vez que o número de obras tem aumentado e ter-se notado uma ligeira descida para o último ano. Uma outra razão poderá ser a solicitação deste tipo de ensaios noutras empresas, o que ameniza a quantidade destes na Mota-Engil. O aumento da oferta deste tipo de ensaios poderá ter aumentado a concorrência nesta área.

Vale relembrar que, para este relatório, os ensaios laboratoriais foram apenas os indicados pela Mota-Engil, sendo que outros tipos de ensaios podem ter sido realizados posteriormente por parte do cliente.

O gráfico que contém os parâmetros geoambientais analisados em laboratório para estes anos também permitiu mostrar uma maior solicitação para as análises de metais, PCBs e TPHs.

Com o estudo pormenorizado dos ensaios geoambientais para este intervalo temporal, também foi possível concluir que o contaminante mais presente no solo em Portugal e que excede os Valores de Referência foi o arsénio. Este potencial contaminante encontra-se muito presente no nosso país dado o substrato geológico regional que contém, em algumas regiões, uma quantidade naturalmente elevada deste contaminante em relação aos Valores de Referência estipulados. Os contaminantes que também se destacaram, em menor quantidade, foram o cobre, o chumbo e o mercúrio.

Os *deskstudy* realizados em duas obras não demonstraram indícios da presença atual ou histórica de fontes de contaminação de solos ou águas subterrâneas no local, pelo que não foram recomendadas investigações adicionais para o tema de solos contaminados.

Para o segundo caso de estudo, foi realizado um estudo geotécnico e ambiental detalhado na Rua do Mirador, freguesia de Ajuda, no distrito de Lisboa. Os resultados obtidos demonstraram anomalias nas cavidades do maciço, onde foram encontradas possíveis cavidades preenchidas por material terroso, zonas extensas de carsificação, cavidades com extensão lateral incerta, e cavidades ou níveis freáticos. Através do estudo ambiental, verificou-se uma contaminação, cujos contaminantes excederam os Valores de Referência estipulados, sendo estes o mercúrio e o chumbo. Uma das amostras também foi classificada como resíduo perigoso pelo código LER 17 05 03, associada às concentrações de óxidos de cobre e zinco.

Com esta dissertação, foi possível comprovar com sucesso que os ensaios geoambientais fazem uma diferença importante nas obras geotécnicas e que é necessária a sua integração nas campanhas de prospeção, de forma a identificar a existência de solos contaminados que possam vir a prejudicar o ambiente e o ser humano. A correta classificação e gestão dos resíduos de construção e demolição, em particular os solos contaminados, é fundamental para cumprir a legislação aplicável e garantir a sustentabilidade das operações, reduzindo o impacto ambiental, social e económico associado à deposição de aterro.

5.1. Perspetivas Futuras

Como perspetivas futuras, seria aconselhável a adição crescente da componente ambiental nas obras geotécnicas. Também deverá ser realizado um estudo posterior, de forma a verificar se no futuro irá ser atingido um patamar de solicitações de obras de ambiente, ou se estas irão continuar a crescer. É igualmente importante verificar se a APA irá atribuir um maior peso e atenção aos Valores de Referência na prospeção ambiental, de forma a considerar os valores normalizados de arsénio presentes em muitas formações geológicas.

Em suma, este estudo reafirma a necessidade de continuar a investir na componente geoambiental e em maiores investimentos nas plataformas geotécnicas de forma a alcançar uma prática mais eficiente, precisa e colaborativa.

Capítulo VI

Referências Bibliográficas

[página propositadamente em branco]

6. Referências Bibliográficas

Afonso M.J., Teixeira C., Teixeira J., Fonseca M., Marques J.M., Carreira P., Rocha F., Espinha Marques J., Chaminé H.I. (2016) Avaliação da condutividade hidráulica de solos através do permeâmetro de Guelph. Exemplo I: aplicação em ambientes urbanos. In H.I. Chaminé, M.J. Afonso, A.C. Galiza (eds.), Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor - Uma Homenagem. Coleção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 113 – 122.

Afonso, A.F., César, M.B. (2016). Correlações entre resultados de penetração dinâmica (DP) com o ensaio de Standard Penetration Test (SPT). In: Actas do 15.º Congresso Nacional de Geotecnia, SPG & FEUP, Porto.

Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2019). Solos contaminados – Guia técnico: análise de risco e critérios de aceitabilidade do risco. APA, Lisboa.

Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2021). Nota Técnica – Classificação de solos e rochas como subproduto. Versão 1.0, 1 de julho de 2021. APA, Lisboa.

Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2022a). Solos contaminados – Guia técnico: plano de amostragem e plano de monitorização do solo. Revisão 2 – janeiro de 2022. APA, Lisboa.

Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2022b). Solos contaminados – Guia técnico: valores de referência para o solo. Revisão 3 – setembro de 2022. APA, Lisboa.

Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2022c). Solos contaminados – Guia técnico: metodologia para determinação de valores de fundo natural do solo. APA, Lisboa.

Aires-Barros, L., 1991. Alteração e alterabilidade de rochas. Instituto Nacional de Investigação Científica, Lisboa.

Alminhas, P.M.C. (2022). Prospeção geotécnica e ensaios In Situ: parâmetros a obter dos ensaios SPT. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. (Dissertação de Mestrado).

ASTM – American Society for Testing and Materials (2003). Standard test method for particle size analysis of soils, D 422-63. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.

Azevedo, I.E.O. (2013). Remediação de solos contaminados por compostos farmacêuticos. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Departamento de Engenharia Química. (Dissertação de Mestrado).

Bell, F.G. (2007). Engineering Geology. Second Edition, Butterworth-Heinemann, Elsevier Ltd, USA.

Cameselle, C., Reddy, K. (2009). Overview of electrochemical remediation technologies. In: C.C. Reddy (Ed.), Electrochemical Remediation Technologies For Polluted Soils, Sediments And Groundwater (pp. 1-28). Willey.

Carvalho, M.M. (2014). Análise fenomenológica da bio-remediação de solos contaminados com compostos orgânicos: perspectiva multidisciplinar. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. (Tese de Doutoramento). URI: <https://hdl.handle.net/10216/95741>

Celada B., Bieniawski, Z.T. (2020). Ground characterization and structural analyses for tunnel design. CRC Press.

Chaminé, H.I., Fernandes, I. (2023). The role of engineering geology mapping and GIS-based tools in geotechnical practice. 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, p. 3–27.

Chastre, C., Neves, J., Ribeiro, D., Neves, M. G., Faria, P. (Eds.). (2023). *Advances on testing and experimentation in civil engineering: geotechnics, transportation, hydraulics and natural resources*. Springer Tracts in Civil Engineering. Springer, Cham.

Clayton, C.R.I., Matthews, M.C., Simons, N.E. (1995). *Site Investigation*. 2nd Edition, Blackwell Science, USA.

Coduto, D.P. (1999). *Geotechnical engineering: principles and practice*. Prentice Hall Inc., Upper Saddle River, NJ.

Coelho, S. (1996). *Tecnologia de fundações*. E. P. Gustave Eiffel.

Farinho, J. (2021). *Campanhas de prospeção geológico-geotécnica: estudo de casos*. Faculdade de Ciências. Universidade de Lisboa, Lisboa. (Dissertação de Mestrado). URI: <http://hdl.handle.net/10451/48646>

Fernandes I., Chaminé H.I. (2023). In situ geotechnical investigations. 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, p. 29–54.

Futuro Silva, A., Fiúza, A. (2011). Distribuição e comportamento do arsénio em ambientes naturais. *Actas do CLME'2011 - 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia e IIICEM - 3º Congresso de Engenharia de Moçambique* (https://paginas.fe.up.pt/~cigar/html/documents/DOC_3605.pdf)

Galiza, A.C., Ramos, L., Fonseca, L. Chaminé, H.I. (2011). Geotecnia mineira de maciços rochosos fracturados para o controlo da qualidade do desmonte. *Revista Ingenium da Ordem dos Engenheiros*, 124 (Jul/Agos): 76-80.

Gonzalez de Vallejo, L.I., Ferrer, M. (2011). *Geological engineering*. CRC Press, Taylor-Francis Group, Boca Raton.

Hatheway, A.W., Kanaori, Y., Cheema, T., T., Griffiths, J., Promma, K. (2005). 10th annual report on the international status of engineering geology—year 2004–2005; encompassing hydrogeology, environmental geology and the applied geosciences. *Eng. Geol.* 81(2): 99-130.

Hencher, S. (2024). *Practical Engineering Geology*. 2nd Edition. CRC Press, Taylor & Francis

Lourenço, A.B.N. (2020). *Campanhas de prospeção geotécnica e realização de ensaios In situ: casos de estudo*. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. (Dissertação de Mestrado).

Martins Carvalho, J. (2016). Conceptualização hidrogeológica (parte I): importância nas investigações geotécnicas de maciços terrosos. In H.I. Chaminé, M.J. Afonso, A.C. Galiza (eds.), *Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor - Uma Homenagem*. Coleção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 53 – 122

Martins, J.B., Miranda, T. (2003). Ensaios de penetração nos solos graníticos da região Norte de Portugal: algumas correlações. *Engenharia Civil, Revista da Universidade do Minho*, 17:5-18.

Matos Fernandes, M. (2021). *Analysis and design of geotechnical structures*. CRC Press, Boca Raton.

Matos Fernandes, M. (2021). *Mecânica dos Solos – Introdução à Engenharia Geotécnica*. Volume 2, 3ª Edição. FEUP edições

Norbury, D., 2020. *Soil and rock description in engineering practice*. 3rd Edition, Whittles Publishing, CRC Press.

OE – Ordem dos Engenheiros (2020). Recomendações na área da geotecnia. Especialização em Geotecnia. Ordem dos Engenheiros, Lisboa.

Pais J., Moniz C., Cabral J., Cardoso J.L., Legoinha P., Machado S., Morais M.A., Lourenço C., Ribeiro M.L., Henriques P., Falé P. (2006). Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000. Notícia Explicativa da folha 34-D (Lisboa). Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.

Pais J., Moniz C., Clavijo E., Dias R.P., Manuppella G., Machado S. (2005). Carta Geológica de Portugal na escala 1: 50 000 da folha 34-D (Lisboa). Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.

Pinho, N. (2024). Digitalização em Geotecnia: da execução em campo à infraestrutura digital de dados (AGS + SIG). Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Dissertação de Mestrado). URI: <http://hdl.handle.net/10400.22/26321>

Ramos, L. (2022). Metodologias interdisciplinares em geotecnia mineira para a qualidade do desmonte de maciços rochosos. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra (Tese de Doutoramento). URI: <https://hdl.handle.net/10316/100395>

Rodrigues, D. (2016). Caracterização geotécnica em pormenor do campus do Instituto Superior de Engenharia do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Dissertação de Mestrado). URI: <http://hdl.handle.net/10400.22/9819>

Sandvik-Tamrock (1999). Rock excavation handbook. Sandvik-Tamrock Corp.

Terzaghi, K., Peck, R.B.; Mesri, G. (1996). Soil mechanics in engineering practice. 3rd edition, Wiley-Interscience.

Vieira da Silva, A. (2022). Observação e instrumentação de obras geotécnicas: acompanhamento de um caso prático na região do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Dissertação de Mestrado).

Sites da internet (consultados de março a maio de 2025)

<https://www.lipor.pt/pt/perguntas-frequentes/residuos/faq-4>

<https://www.progeo.com.br/piezometro#group1->

https://geoportal.lneg.pt/pt/dados_abertos/cartografia_geologica/cgp50k/34-D

https://bmpjesquisa.cm-lisboa.pt/ords/app_bm.download_my_file?p_file=4894

<https://apambiente.pt/>

<https://apambiente.pt/avaliacao-e-gestao-ambiental/guias-tecnicos-0>

[página propositadamente em branco]

Anexos

Boletins de Sondagens (logs) para o Caso de Estudo

(CD-Rom)

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Eu, **Alícia Mariana Nunes Ribeiro**, N.º CC: 30628422-7-ZX5:

Declaro ter conduzido e desenvolvido este trabalho académico com integridade e ética. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à elaboração da dissertação/projeto/estágio.

Declaro ainda que não recorri a ferramentas de inteligência artificial (IA) — texto, imagem, vídeo ou outro formato — para fins académicos de pesquisa avançada de tópico específico e fiz devida citação deste recurso sem colocar em causa os direitos de autor ou uso indevido de informações ou falsificação de conteúdos.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

Alícia Mariana Nunes Ribeiro

ISEP, Porto, 19 de junho de 2025