

Linha Ferroviária de Alta Velocidade entre Porto e Lisboa. Lote A – Porto a Oiã (Aveiro). Fase de Concurso

Mariana Fernandes Batista

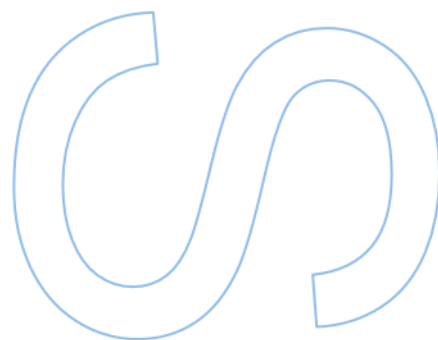
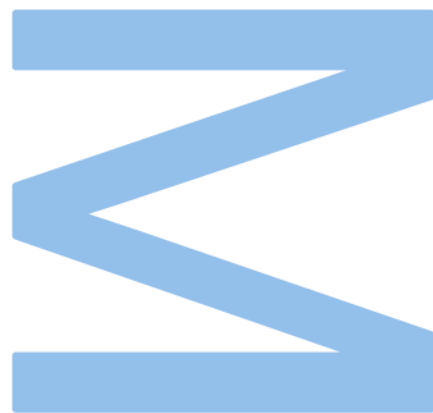
Mestrado em Geomateriais e Recursos Geológicos

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território e

Departamento de Geociências

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e Universidade de
Aveiro

2024



Linha Ferroviária de Alta Velocidade entre Porto e Lisboa. Lote A – Porto a Oiã (Aveiro). Fase de Concurso

Mariana Fernandes Batista

Relatório de Estágio realizado no âmbito do Mestrado de
Geomateriais e Recursos Geológicos

Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território e

Departamento de Geociências

2024

Orientador

António Guerner Dias, Professor Auxiliar, DGAOT - FCUP

Supervisor externo na Entidade de Acolhimento

Raquel Pais, Geóloga, GEG

GEG

Aos meus pais, pelo carinho e amor constante.

Agradecimentos

O fim deste ciclo representa apenas o início de um novo, porém, não conseguiria chegar a este ponto sem o apoio, a amizade, o carinho e a força que sinto das pessoas à minha volta.

Primeiramente quero agradecer aos meus pais, Elsa e Rui, que me educaram e ensinaram a seguir os meus sonhos, dando-me todas as oportunidades e ferramentas para eu chegar onde estou hoje, sempre com carinho, amor e palavras de motivação e orgulho me tornaram na pessoa que sou. Quero agradecer à minha família, a minha avó, os meus tios e os meus primos que torceram para mim, participaram na minha vida e me apoiaram em todas as ocasiões. Agradeço também à minha madrinha, que sempre teve um abraço e uma palavra amiga quando eu precisei.

Seguidamente, agradeço ao meu orientador de estágio, Professor Doutor António Guerner, primeiramente por ter aceitado este papel e secundamente por me ajudar e encaminhar da melhor forma. Também aos professores da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e da Universidade de Aveiro, que me ensinaram e me proviram de conhecimentos durante os últimos cinco anos só tenho palavras de agradecimento por tudo.

Não posso deixar de agradecer ao GEG por me ter permitido esta oportunidade de estágio, e, especialmente, à minha orientadora da parte da empresa, a Geóloga Raquel Pais, pelos conhecimentos que me transmitiu, pela compreensão, paciência e um sorriso quando assim o precisei. Ao Ricardo, meu colega de estágio, agradeço as conversas e o companheirismo. Quero agradecer também à Carmina, ao Pedro Pereira, ao Rui, ao Sérgio, ao Guilherme, e a todo o Departamento de Geotecnia pela compreensão, ensinamentos, sorrisos e apoio. Agradeço à Mafalda, ao Pedro Nascimento, à Lana, ao Diogo, ao Manuel e ao Alberto, que mantiveram um ambiente descontraído e convidativo, pelas conversas e pelos risos.

A todas as pessoas que conheci e fizeram parte da minha vida durante os cinco anos do meu percurso académico, agradeço também os bons momentos. Em especial, aos que se tornaram a minha família longe de casa, que me apoiaram, que me deram momentos de riso e de felicidade, memórias que vão sempre continuar comigo e que me trouxeram até aqui, obrigada Diogo, Catarina, Pedro, Gonçalo Macedo e Gonçalo Castro. Obrigada Inês, que, nascidas na mesma cidade mas a estudar em cidades diferentes, conseguimos manter uma amizade e um carinho especial.

Agradeço à Maria José, por me ter acolhido na sua casa por quatro dos anos em que estive no Porto e por todos os dias ter um sorriso e uma conversa. Também à Conceição, pelos últimos sete meses, pelo à vontade e amizade que logo criou comigo, por uma conversa ao jantar e por uns risos depois do mesmo, por me ter acolhido na sua casa e por me ter feito sentir em casa, um especial obrigada.

Assim, a minha maior gratidão a todos por terem feito parte do meu percurso académico e pessoal, espero que continuem a fazer parte da minha vida neste novo ciclo que início, bem como naqueles que estão por vir.

Resumo

A Geologia Aplicada é uma área da geologia que é utilizada em diversos contextos práticos e tem duas principais componentes, a sua aplicação na área da exploração de recursos geológicos e a sua aplicação na área da engenharia civil. A disciplina da Geologia relacionada com o apoio às atividades da Engenharia Civil trata-se da Geologia de Engenharia, e apoia nomeadamente a área da Geotecnia, na qual existe, especialmente o estudo do comportamento físico e mecânico das rochas e dos solos.

Neste relatório é apresentado, ainda que de forma algo resumida, um estágio realizado em contexto empresarial, com o objetivo de aplicar os conhecimentos geológicos na geotecnia, através de estudos geológicos-geotécnicos que permitiram um estudo rigoroso das propriedades e comportamento dos maciços terrosos e rochosos interessados para a obra. Assim, foi realizada uma identificação, descrição e caracterização dos diversos materiais estudados que permite fornecer a informação necessária aos profissionais das outras áreas, nomeadamente a geotecnia.

O projeto inserido neste relatório tem a ver com a Fase de Concurso da nova Linha de Alta Velocidade entre Porto e Lisboa, com vista a uma diminuição do tráfego de passageiros na Linha do Norte, atualmente sobre-explorada. Trata-se de um projeto linear extenso, que atravessa várias litologias de diferentes origens e idades, que obrigam a um estudo profundo sobre cada uma delas e sobre as restantes características geológicas a que estão associadas, como a tectónica, a hidrogeologia, entre outras.

Palavras-chave: Estudo Geológico-Geotécnico, Caracterização Geológica, Maciço Rochoso, Campanhas de Prospeção.

Abstract

Applied Geology is the branch of Geology, which is used in the practical contexts, being the main two, its application in the field of geological resources exploration and the application in civil engineering. The branch in Geology related to supporting Civil Engineering is known as Engineering Geology and supports, specifically, the field of Geotechnics. This field involves the study of the physical and mechanical behavior of rocks and soil.

This report summarizes an internship conducted in a business context, intending to apply geological knowledge to geotechnics through geological-geotechnical studies. These studies allowed for a thorough examination of the properties and behaviors of soil and rock masses relevant to the project. Thus, identification, description, and characterization of the materials studied were carried out to provide the necessary information to professionals in other fields, particularly geotechnics.

The project discussed in this report pertains to the Tender Phase of the new High-Speed Railway Line between Porto and Lisbon, aiming to reduce passenger traffic on the currently overburdened Linha do Norte. The High-Speed Railway Line is an extensive linear project that crosses various lithologies of different origins and ages, necessitating an in-depth study of each one and the associated geological characteristics, such as tectonics, hydrology, and others.

Keywords: Geological-Geotechnical Study, Geological Characterization, Rock Mass, Prospecting Campaigns.

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	2
1.2	ESTRUTURA.....	2
1.3	GEG.....	3
1.4	LINHA DE ALTA VELOCIDADE PORTO-LISBOA FASE 1 – LOTE A	4
1.5	ESTUDOS ANTERIORES	5
2	COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DAS ROCHAS E DOS SOLOS	6
2.1	MECÂNICA DAS ROCHAS	7
2.1.1	<i>Caracterização e Descrição do Maciço Rochoso</i>	<i>8</i>
2.1.1.1	Propriedades Físicas da Rocha	8
2.1.1.2	Propriedades Mecânicas da Rocha.....	13
2.1.1.3	Descontinuidades	14
2.1.1.3.1	Tipos de Descontinuidades	15
2.1.1.3.2	Caracterização das Descontinuidades	16
2.1.1.4	Descrição do Maciço Rochoso	21
2.1.2	<i>Classificações Geomecânicas do Maciço Rochoso.....</i>	<i>23</i>
2.1.2.1	“Rock Quality Designation” (RQD).....	23
2.1.2.2	“Geological Strength Index” (GSI)	25
2.1.2.3	“Rock Mass Rating” (RMR)	26
2.2	MECÂNICA DOS SOLOS.....	28
2.2.1	<i>Descrição e Caracterização dos Solos</i>	<i>28</i>
2.2.1.1	Granulometria dos Solos	28
2.2.1.2	Plasticidade	29
2.2.1.3	Propriedades Físicas dos Solos	30
2.2.1.4	Propriedades Mecânicas dos Solos	32
2.2.1.5	Minerais de Argila.....	32
2.2.1.6	Resistência dos Solos	35
2.2.2	<i>Classificação de Solos</i>	<i>35</i>
2.2.2.1	Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)	35
2.2.2.2	Classificação para Fins Rodoviários (AASHTO).....	36
2.2.2.3	Classificação GTR (LCPC/SETRA)	38
3	ESTUDO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO.....	40
3.1	ESTUDO PRÉVIO	41
3.2	CAMPANHAS DE PROSPEÇÃO	42
3.2.1	<i>Investigação In Situ</i>	<i>42</i>
3.2.1.1	Reconhecimento Geológico de Campo	43
3.2.1.2	Sondagens Geotécnicas	44

3.2.1.3	Poços e Valas de Reconhecimento	46
3.2.1.4	Prospecção Geofísica	48
3.2.1.4.1	Métodos Sísmicos de Superfície	48
3.2.1.4.2	Métodos Sísmicos “Cross-hole”	49
3.2.1.5	Ensaio In Situ.....	50
3.2.1.5.1	“Standard Penetration Test” (SPT)	50
3.2.1.5.2	Penetrómetros Dinâmicos	51
3.2.2	<i>Ensaio Laboratorial e Ex situ</i>	52
3.2.2.1	Ensaio de Identificação de Solos.....	52
3.2.2.1.1	Análise Granulométrica por Peneiração	52
3.2.2.1.2	Limites de Atterberg	53
3.2.2.1.3	Valor de Azul de Metileno.....	55
3.2.2.1.4	Equivalente de Areia	56
3.2.2.2	Ensaio de Caracterização de Solos.....	57
3.2.2.2.1	Proctor Modificado.....	57
3.2.2.2.2	California Bearing Ratio (CBR).....	58
3.2.2.2.3	Teor em Água Natural	59
3.2.2.3	Ensaio de Compressão Uniaxial.....	60
4	PROJETO: LINHA DE ALTA VELOCIDADE PORTO-LISBOA FASE 1 – LOTE A.61	
4.1	SOLUÇÕES DE TRAÇADO, VARIANTES E LIGAÇÕES	62
4.2	ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO	64
4.2.1	<i>Tectónica</i>	64
4.2.1.1	Ciclo Varisco	64
4.2.1.2	Zona de Cisalhamento Porto-Tomar-Ferreira do Alentejo.....	65
4.2.2	<i>Zonas Tectonoestratigráficas</i>	66
4.2.2.1	Orla Mesozóica Ocidental	68
4.2.2.2	Zona de Ossa Morena.....	69
4.2.2.3	Terrenos Finisterra	70
4.2.2.4	Zona Centro Ibérica (ZCI).....	72
4.2.3	<i>Unidades Litológicas</i>	72
4.2.3.1	Unidade de Espinho –Xge.....	73
4.2.3.2	Unidade de Lourosa – Xyz	73
4.2.3.3	Unidade de Arada – X	74
4.2.3.4	Supergrupo Dúrico-Beirão – CXG	75
4.2.3.5	Arenitos de Eirol – T	75
4.2.3.6	Cretácico – C.....	76
4.2.3.7	Depósitos do Quaternário – Q.....	78
4.2.3.8	Depósitos Modernos – Al ou At	78
4.2.3.9	Granito do Porto – Ym	78
4.2.3.10	Granito da Madalena – Yπg.....	79
4.2.4	<i>Geomorfologia</i>	79
4.2.5	<i>Hidrogeologia</i>	80

4.2.6	<i>Sismicidade</i>	82
4.3	TRABALHOS REALIZADOS	84
4.3.1	<i>Campanhas de Prospeção Anteriores</i>	84
4.3.2	<i>Campanha de Prospeção Complementar</i>	85
4.3.3	<i>Síntese de Resultados</i>	86
4.3.3.1	Perfis Sísmicos de Refração	86
4.3.3.2	Poços de Reconhecimento	89
4.3.3.3	Sondagens Mecânicas	90
4.3.3.4	Ensaio SPT	97
4.3.3.5	PDL	98
4.3.3.6	DPSH	99
4.3.3.7	Ensaio Laboratoriais	103
4.3.3.7.1	Ensaio de Identificação e Caracterização dos Solos	103
4.3.3.7.2	Ensaio de Compressão Uniaxial	106
4.4	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	107
4.4.1	<i>Trecho 1</i>	107
4.4.1.1	Túnel do Mamodeiro	110
4.4.2	<i>Trecho 2</i>	111
4.4.3	<i>Trecho 3</i>	113
4.4.3.1	Túnel do Souto	117
4.4.3.2	Túnel de Cassufas	118
4.4.3.3	Túnel de Casaldeita	119
4.4.3.4	Túnel de Negrelos	120
4.4.3.5	Túnel de Vila Nova de Gaia	121
4.4.4	<i>Trecho 4</i>	122
4.4.4.1	Estação Subterrânea de Santo Ovídio	124
4.4.4.2	Túnel de Vila Nova de Gaia	126
4.4.5	<i>Ligação de Canelas à Linha do Norte</i>	126
5	CONCLUSÃO	128
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
7	ANEXOS	139
7.1	ANEXO 1 – MECÂNICA DAS ROCHAS	140
7.2	ANEXO 2 – MECÂNICA DOS SOLOS	143

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Valores normais para a porosidade de vários tipos de rocha (adaptado de Vallejo et al., 2004).	10
Tabela 2.2 Valores normais para o peso específico de vários tipos de rochas (adaptado de Vallejo et al., 2004).	11
Tabela 2.3 Valores normais para a condutividade hidráulica de vários tipos de rochas (adaptado de Vallejo et al., 2004).	13
Tabela 2.4 Tipos de discontinuidades (adaptado de Vallejo et al., 2004).	15
Tabela 2.5 Descrição das discontinuidades atendendo ao espaçamento entre si (ISRM, 1978).	19
Tabela 2.6 Descrição das discontinuidades atendendo à sua persistência (ISRM, 1978).	19
Tabela 2.7 Descrição das discontinuidades atendendo ao seu perfil de rugosidade ISO.	20
Tabela 2.8 Descrição das discontinuidades atendendo à abertura entre as paredes da própria discontinuidade (ISRM, 1978).	21
Tabela 2.9 Descrição da alteração do maciço rochoso	21
Tabela 2.10 Descrição da fraturação do maciço rochoso e a correspondência com os valores de espaçamento entre discontinuidades no maciço.	22
Tabela 2.11 Descrição da resistência do maciço rochoso e a correspondência com os valores de resistência à compressão simples	22
Tabela 2.12 Classificação do maciço de acordo com Barton (adaptada de Hoek, 2006).	24
Tabela 2.13 Classificação da orientação das discontinuidades em relação ao alinhamento da obra (adaptado de Bieniawski, 1989).	26
Tabela 2.14 Penalização que a orientação das discontinuidades pode ter, dependendo do tipo de obra e da orientação das discontinuidades em relação ao alinhamento da mesma (adaptado de Bieniawski, 1989).	27
Tabela 2.15 Classificação do maciço rochoso de acordo com Bieniawski (1989). ..	27
Tabela 2.16 Nomenclatura utilizada na descrição dos solos, de acordo com a granulometria das partículas que o constituem (AASHTO, 2021).	28
Tabela 2.17 Descrição da resistência do solo e a correspondência com os valores de resistência à compressão simples (EN ISO 14689:2017).	35
Tabela 2.18 Propriedades importantes dos solos (adaptado de Wagner, 1957). .	36
Tabela 2.19 Classificação para Fins Rodoviários (AASHTO, 2021).	37

Tabela 2.20 Materiais comuns em cada classe (adaptado de NFP 11 300, 1992).	39
Tabela 3.1 Objetivos do estudo geológico-geotécnico nas diversas fases do projeto (adaptado de Vallejo et al., 2004).	41
Tabela 3.2 Intervalos da velocidade com que as ondas P se propagam em determinados materiais.	49
Tabela 3.3 Classificação das areias quanto à compacidade (ISO 22476-3:2005).	51
Tabela 3.4 Classificação de argilas quanto à consistência (ISO 22476-3:2005).	51
Tabela 3.5 Características do cone utilizado no ensaio (ISO 17892-12:2018).	54
Tabela 4.1 Tipologia dos terrenos com vista à definição do Coeficiente Sísmico de Referência, (segundo RSAEEP, 1983).	83
Tabela 4.2 Quantidade de trabalhos de prospeção realizados em campanhas de prospeção anteriores (IP, 2024 ^a).	84
Tabela 4.3 Quantidade de ensaios laboratoriais realizados em campanhas de prospeção anteriores (IP, 2024a).	85
Tabela 4.4 Quantidades de trabalhos e ensaios realizados durante a campanha de prospeção complementar (IP, 2024a).	85
Tabela 4.5 Síntese da informação dos perfis sísmicos de refração obtidos durante as várias campanhas de prospeção (IP, 2024a).	86
Tabela 4.6 Horizontes Sísmicos principais e as suas características.	89
Tabela 4.7 Síntese da informação sobre os poços de reconhecimento próximos ao traçado (IP, 2024a).	90
Tabela 4.8 Síntese da informação conseguida através das sondagens mecânicas realizadas próximas ao traçado (IP, 2024a).	91
Tabela 4.9 Comprimento total de cada material.	96
Tabela 4.10 Valores de SPT registados para cada uma das Unidades Litoestratigráficas que intercetam o traçado.	97
Tabela 4.11 Informação compilada dos PDL's próximos ao traçado aprovado pelo DIA (IP, 2024a).	98
Tabela 4.12 Síntese dos dados obtidos com os ensaios DPSH realizados nas campanhas de prospeção (IP, 2024a).	99
Tabela 4.13 Resultados dos ensaios de identificação realizados a materiais terrosos (IP, 2024a).	103
Tabela 4.14 Síntese dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização realizados aos materiais terrosos (IP, 2024a).	104

Tabela 4.15 Resultado dos Ensaios de Compressão Uniaxial realizados (IP, 2024b).	106
Tabela 4.16 Classificação dos Depósitos do Quaternário tendo em conta os resultados dos ensaios laboratoriais nelas realizados.	108
Tabela 4.17 Classificação das formações Cretácicas tendo em conta os resultados dos ensaios laboratoriais nelas realizados.	109
Tabela 4.18 Classificação da Unidade de Arada tendo em conta os resultados dos ensaios laboratoriais nelas realizados.	110
Tabela 4.19 Classificação dos Depósitos do Quaternário tendo em conta os resultados dos ensaios laboratoriais nelas realizados.	112
Tabela 4.20 Classificação da Unidade de Espinho tendo em conta os resultados obtidos com os trabalhos de prospeção.	113
Tabela 4.21 Classificação dos Xistos de Arada tendo em conta os resultados dos ensaios laboratoriais nelas realizados.	113
Tabela 4.22 Classificação dos Aluviões tendo em conta os resultados dos ensaios laboratoriais nelas realizados.	114
Tabela 4.23 Classificação da Unidade de Lourosa tendo em conta os resultados dos ensaios laboratoriais nelas realizados.	116
Tabela 4.24 Classificação do Granito da Madalena tendo em conta os resultados obtidos com os trabalhos de prospeção.	116
Tabela 4.25 Classificação do Complexo Xisto-Grauváquico tendo em conta os resultados obtidos com os trabalhos de prospeção	117
Tabela 4.26 Classificação do Granito do Porto tendo em conta os resultados obtidos com os trabalhos de prospeção	117
Tabela 4.27 Classificação do Complexo Xisto-Grauváquico tendo em conta os resultados obtidos com os trabalhos de prospeção.	124
Tabela 4.28 Classificação do Granito do Porto tendo em conta os resultados obtidos com os trabalhos de prospeção	124
Tabela 7.1 Parâmetros para o cálculo do RMR básico (adaptado de Bieniawski, 1989).	141
Tabela 7.2 Guia para a escavação e suporte de túneis (adaptado de Bieniawski, 1989).	142
Tabela 7.3 Sistema Unificado de Classificação de Solos por Casagrande.	144

Lista de Figuras

Figura 1.1 Faseamento e enquadramento da Nova Linha de Alta Velocidade Porto-Lisboa (IP, 2023).	4
Figura 2.1 Ângulos medidos numa descontinuidade (retirado de Vallejo et al., 2004).	17
Figura 2.2 Simbologia utilizada na representação de descontinuidades em mapa (ISRM, 1978).	18
Figura 2.3 Perfis de rugosidade (ISO 14689_2017 (E))	20
Figura 2.4 Exemplo do cálculo do RQD (retirado de Hoek, 2006).	23
Figura 2.5 Ábaco para a classificação GSI (retirado de Hoek, 2006).	25
Figura 2.6 Gráfico da Carta de Plasticidade de Casagrande.	30
Figura 2.7 Estrutura dos minerais caulinite (à esquerda) e halosite (à direita). A letra “G” representa a camada tetraédrica com Si^{4+} (retirado de Whitlow, 1995).	33
Figura 2.8 Estrutura do mineral illite. A camada “G” representa a camada tetraédrica com Si^{4+} . (retirado de Whitlow, 1995).	34
Figura 2.9 Estrutura do mineral montmorilonite. A camada “G” representa a camada tetraédrica com Si^{4+} . (retirado de Whitlow, 1995).	34
Figura 2.10 Gráfico com a Classificação de Solos LCPC/SETRA para solos com dimensão máxima ≤ 50 mm (adaptado de NFP 11 300, 1992).	38
Figura 2.11 Gráfico com a Classificação de Solos LCPC/SETRA para solos com dimensão máxima > 50 mm (adaptado de NFP 11 300, 1992).	39
Figura 3.1 Exemplo de uma Ficha de Reconhecimento de Campo.	44
Figura 3.2 Exemplo do testemunho de uma sondagem (Campanha de Prospeção de 2023 realizada pela IP para o concurso do Lote A da Fase 1 da Linha de Alta Velocidade Porto-Lisboa).	45
Figura 3.3 Exemplo do boletim de uma sondagem (Campanha de Prospeção de 2023 realizada pela IP para o concurso do Lote A da Fase 1 da Linha de Alta Velocidade Porto-Lisboa).	46
Figura 3.4 Exemplo de um poço de prospeção (Campanha de Prospeção de 2005 realizada pela IP para a Linha de Alta Velocidade Porto-Lisboa).	47
Figura 4.1 Traçado aprovado na Declaração de Impacte Ambiental (DIA) de julho de 2023.	63
Figura 4.2 Divisões do Maciço Ibérico, a cinzento-claro, de acordo com Ribeiro et al. (1990): ZC - Zona Cantábrica, ZOAL - Zona Oeste-Asturo-Leonesa, ZGTOM - Zona de Galiza-Trás-os-Montes, ZCI - Zona Centro-Ibérica, ZOM - Zona de Ossa-Morena,	

ZSP - Zona Sul Portuguesa. A preto encontram-se os terrenos alóctones da ZGTOM (adaptado de Moreira, 2012).....	67
Figura 4.3 Mapa das zonas tectonoestratigráficas, marcado a vermelho trata-se do traçado da Linha de Alta Velocidade (retirado da Carta Geológica de Portugal à Escala 1:1 000 000).	68
Figura 4.4 O Terreno Finisterra no contexto do Varisco Europeu: a) Arco Ibero-Armoricano, b) Contexto geral do Terreno Finisterra, c) Secções do Terreno Finisterra na zona junto à Zona de Cisalhamento Porto-Tomar-Ferreira do Alentejo, d) Arquipélago das Berlengas (retirado de Moreira et al., 2020).	71
Figura 4.5 A – Mapa de intensidade sísmica (RSA, 1983), B – Carta de Isossistas de Intensidades Máximas (Atlas do Ambiente, 1996).....	82
Figura 4.6 Zonamento Sísmico de Portugal, de acordo com o Eurocódigo 8.....	83
Figura 4.7 Perfil sísmico PS010A-23 (IP, 2024a).....	121

Lista de Abreviaturas

AASHTO	<i>AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS</i>
AIA	AVALIAÇÃO DE IMPACTE AMBIENTAL
APA	AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE
ASTM	<i>AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS</i>
CBR	<i>CALIFORNIA BEARING TEST</i>
CPT	<i>CONE PENETRATION TEST</i>
CXG	COMPLEXO XISTO-GRAUVÁQUICO
DGAOT	DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS, AMBIENTE E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO
DGES	DIREÇÃO GERAL DO ENSINO SUPERIOR
DGEO	DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
DIA	DECLARAÇÃO DE IMPACTE AMBIENTAL
DPSH	<i>DYNAMIC PROBING SUPER-HEAVY</i>
EA	EQUIVALENTE DE AREIA
FCT	FUNDAÇÃO PARA A CIÊNCIA E A TECNOLOGIA
FCUP	FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DO PORTO
GEG	GABINETE DE ESTRUTURAS E GEOTECNIA
GSi	<i>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX</i>
ILAB	INTERLIGAÇÃO SOLUÇÃO A PARA SOLUÇÃO B
ILBA	INTERLIGAÇÃO SOLUÇÃO B PARA SOLUÇÃO A
ISRM	<i>INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS</i>
IP	ÍNDICE DE PLASTICIDADE
IP	INFRAESTRUTURAS DE PORTUGAL
ISSO	<i>INTERNATIONAL ORGANISATION OF STANDARDIZATION</i>
LAV	LINHA DE ALTA VELOCIDADE
LCPC	<i>LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES</i>
LL	LIMITE DE LIQUIDEZ
LNEC	LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL
LP	LIMITE DE PLASTICIDADE
MGCR	<i>MID-GERMAN CRYSTALLINE RISE</i>
OAE	OBRAS DE ARTE ESPECIAIS
PDL	PENETRÓMETRO DINÂMICO LIGEIRO

RMR	<i>ROCK MASS RATING</i>
RQD	<i>ROCK QUALITY DESIGNATION</i>
RSAEEP	REGULAMENTO DE SEGURANÇA E AÇÕES PARA ESTRUTURAS DE EDÍFICOS E PONTES
SETRA	<i>SERVICE D'ÉTUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES</i>
SGP	SOCIEDADE GEOLÓGICA DE PORTUGAL
SPT	<i>STANDARD PENETRATION TEST</i>
UA	UNIVERSIDADE DE AVEIRO
UCS	<i>UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH</i>
UP	UNIVERSIDADE DO PORTO
VAM	VALOR DE AZUL DE METILENO
ZCI	ZONA CENTRO-IBÉRICA
ZCPTF	ZONA DE CISALHAMENTO PORTO-TOMAR-FERREIRA DO ALENTEJO
ZCTBC	ZONA DE CISALHAMENTO TOMAR-BADAJÓZ-CÓRDOVA
ZOM	ZONA DE OSSA MORENA

1 Introdução

O presente relatório foi elaborado no seguimento da Unidade Curricular de Estágio, do programa curricular de segundo ano do Mestrado em Geomateriais e Recursos Geológicos da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e da Universidade de Aveiro. Este estágio foi realizado em contexto empresarial em colaboração com o GEG - Gabinete de Estruturas e Geotecnia.

Este estágio decorreu entre o dia 2 de outubro de 2023 e 1 de abril de 2024, com duração de 6 meses e, neste período, foi prestado apoio no projeto da Linha de Alta Velocidade Porto-Lisboa, na preparação para a fase de concurso do Lote A - Porto a Oia, o qual será abordado neste relatório.

1.1 Objetivos

Como referido no plano de estágio acordado entre todas as partes, os objetivos deste estágio passam pelo primeiro contacto com a realização de um projeto geológico-geotécnico, para além de uma maior aprendizagem sobre a geologia num contexto mais prático, associado à geotecnia. Foram estabelecidos durante o estágio uma série de objetivos, de modo a guiar a direção do trabalho e permitir a sua organização. Num enquadramento geral, o objetivo do estágio foi permitir a participação numa equipa e num projeto geotécnico em contexto de trabalho real. A este somam-se objetivos mais específicos quanto ao trabalho realizado, como a aprendizagem sobre a abordagem geotécnica e geológica durante a fase de concurso, quais as metodologias a aplicar, os tipos de ensaios adequados a diferentes cenários bem como a interpretação correta dos dados por eles fornecidos.

Este relatório foi realizado com o objetivo de, para além da exposição de elementos relacionados com o tema do estágio, exibir os fundamentos teóricos essenciais para o desenvolvimento de um estudo geológico-geotécnico, abordando o comportamento e características dos solos e rochas, as classificações associadas aos mesmos, e as atividades, ensaios laboratoriais e de campo e prospeção realizadas durante o estudo geológico-geotécnico.

1.2 Estrutura

A estrutura deste relatório foi desenvolvida de forma a dar uma introdução teórica aos estudos geológico-geotécnicos e o que é que está neles incluído, antes de abordar os projetos nos quais houve a participação da estudante. Assim:

- Este primeiro capítulo trata da Introdução e procura fazer uma breve explicação do estágio, dos seus objetivos, da empresa em que se realizou o estágio – o GEG – como se formou e em que projetos esteve já envolvida, e ainda uma introdução geral ao projeto em que a estudante participou e que trata de ser o principal tema deste relatório;
- No segundo capítulo foi feita uma abordagem teórica àquilo que são a Mecânica das Rochas e a Mecânica dos Solos, de modo a melhor entender o trabalho realizado durante os meses em que decorreu o estágio;
- O terceiro capítulo procura fazer uma abordagem ao que é um Estudo Geológico Geotécnico e aos métodos usados e estudados durante o estágio;
- No quarto capítulo é então abordado de forma aprofundada o tema deste estágio – a preparação para a fase de concurso do Lote A da Fase 1 da Linha de Alta Velocidade.
- Por fim, no quinto capítulo apresentam-se as conclusões retiradas durante a preparação deste relatório.

1.3 GEG

O GEG é uma empresa internacional de consultoria e projetos de engenharia, fundada no Porto em 1987, tendo feito parte de inúmeros projetos nacionais e internacionais. O seu primeiro grande projeto tratou-se do projeto do Sistema de Metro Ligeiro da Área Metropolitana do Porto, em 1996, que viria a proporcionar à empresa um crescimento notável. No início dos anos 2000 a empresa começa o seu processo de internacionalização, com projetos em Angola e, posteriormente, em vários países europeus, relações que mantém até hoje.

Os diversos projetos e estudos desenvolvidos pelo GEG variam entre avaliações de riscos e segurança, planeamento e gestão de serviços, fiscalização, viabilidade das obras tendo em consideração as questões ambientais e de sustentabilidade. Assim, como referido acima é de destacar os projetos desenvolvidos pela empresa no contexto ferro e rodoviário, bem como outras vias de comunicação como aeroportos, o próprio metro, e engenharia de transportes, edifícios, entre outras disciplinas.

1.4 Linha de Alta Velocidade Porto-Lisboa Fase 1 – Lote A

A Linha de Alta Velocidade entre Porto e Lisboa (LAV) visa reduzir o tempo de viagem entre Porto e Lisboa e ainda diminuir a quantidade de passageiros deste trajeto da Linha do Norte, de forma que nesta possam circular comboios de passageiros de serviço regional e suburbano e de mercadorias. Em 2008-2010 foram realizados estudos, os quais foram aprovados pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA), para o projeto da Alta Velocidade. Em 2022, foi reatado o projeto para a Linha de Alta Velocidade, do qual uma das prioridades foi rever e reformular os estudos de 2008-2010 (IP, 2023).

O projeto foi então dividido em 3 fases, Fase 1 – Porto a Soure –, Fase 2 – Soure ao Carregado – e Fase 3 – Carregado a Lisboa –, como mostra a Figura 1.1. Foi decidido que a primeira fase fosse entre Porto e Soure dado que esta é a zona em que a Linha do Norte se encontra mais congestionada, o que também levou à divisão desta fase em dois lotes: Lote A, o tema deste relatório, entre Aveiro (Oiã) e Porto (Campanhã), e Lote B, entre Soure e Aveiro (Oiã) (IP, 2023).

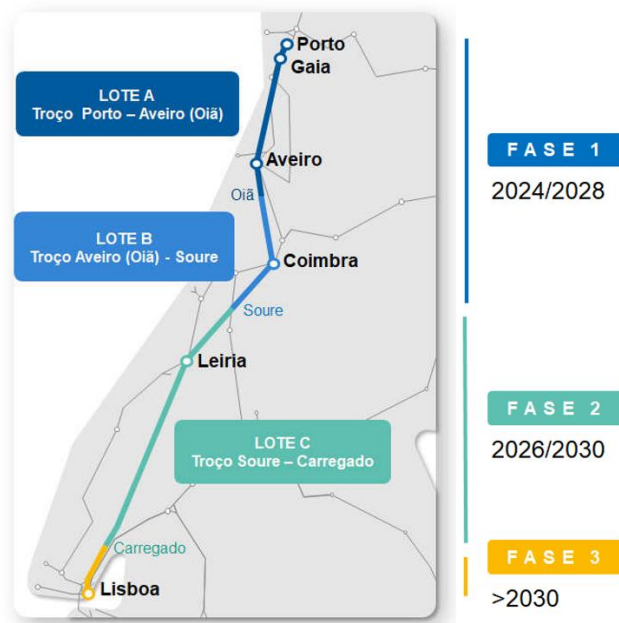


Figura 1.1 Faseamento e enquadramento da Nova Linha de Alta Velocidade Porto-Lisboa (IP, 2023).

No estudo de 2008-2010 foram desenvolvidos vários traçados alternativos para o Lote A – Solução A e B, até à Estação de Santo Ovídio, em Vila Nova de Gaia –, os quais foram mais recentemente reavaliados e aos quais se acrescentaram possíveis

ligações entre as duas, uma ligação à Linha do Norte em Canelas, Estarreja, que também apresenta traçados alternativos, e ainda uma Solução C que trata do trajeto entre a Estação de Santo Ovídio e a Estação da Campanha, ficando o trajeto deste lote com cerca de 70 km, sem contar com a Ligação à Linha do Norte em Canelas (IP, 2023)

1.5 Estudos Anteriores

A Linha de Alta Velocidade Porto-Lisboa é um projeto de elevada importância para Portugal, não só pela sua dimensão, mas também pela evolução que revela na rede de linha férrea portuguesa. Embora só no ano passado tenha sido aprovado um traçado na Declaração de Impacte Ambiental (DIA), o projeto já foi alvo de estudo em anos anteriores.

Entre 2004 e 2012 foram realizados vários Estudos Prévios pela IP no âmbito da Nova Ligação Ferroviária de Alta Velocidade do Eixo Lisboa – Porto (2008-2010). Para esse projeto foram então realizados os seguintes estudos:

- Estudo Prévio da Ligação Ferroviária de Alta Velocidade entre Aveiro e Vila Nova de Gaia (2009) – Lote A;
- Estudo Prévio da Ligação Ferroviária de Alta Velocidade entre Vila Nova de Gaia e o Aeroporto Francisco Sá Carneiro (2011) – Lote E.

Destes Estudos Prévios, apenas o primeiro foi submetido a Avaliação de Impacte Ambiental (AIA), recebendo a DIA favorável, em 2010, à Alternativa 8 que correspondia à seguinte combinação de Soluções para cada um dos trechos:

- Trecho 1: Solução B1
- Trecho 2: ILBA conjugada com Solução A2
- Trecho 3: Solução A3
- Trecho 4: Solução A4

Quanto ao Estudo Prévio para o Lote E, este nunca foi submetido a AIA, porém serviu de base para a Solução C, acrescentada em 2023, que compreende a nova Estação Subterrânea de Santo Ovídio e a sua ligação, por túnel e por uma ponte que atravessa o Rio Douro, à Estação da Campanha.

2 Comportamento Geotécnico das Rochas e dos Solos

O estudo do comportamento dos solos e das rochas trata do estudo de como estes materiais respondem às diversas cargas a que estão sujeitos, bem como às condições ambientais e agentes de meteorização, sendo, assim, essencial na aplicação prática da geologia numa componente associada à engenharia.

As áreas que estudam o comportamento dos solos e das rochas são, respetivamente a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas, e, para este trabalho, embora sejam relevantes ao estudo, será dada uma maior ênfase à Mecânica das Rochas.

2.1 Mecânica das Rochas

A Mecânica das Rochas trata da disciplina que estuda o comportamento dos materiais rochosos, em especial no que toca às diversas características e propriedades mecânicas que o maciço pode ter, bem como a sua resposta quando o ambiente à sua volta muda (Vallejo et al., 2004).

Esta disciplina tornou-se motivo de estudo devido à utilização do meio rochoso para obras, superficiais ou subterrâneas, e para a exploração de recursos geológicos. A importância do meio geológico é que este pode ser usado como estrutura, no caso de obras subterrâneas e taludes, como suporte para outras estruturas, no caso das fundações de edifícios, e até como material de construção como é o caso dos materiais de aterro (Vallejo et al., 2004).

São diversos os aspetos que afetam a integridade do maciço rochoso e a forma como este se comporta, entre elas propriedades físicas, como a densidade do material rochoso, a permeabilidade, o grau de alteração, entre outros, e ainda propriedades mecânicas, como a resistência à compressão, as tensões que afetam o material e como ele reage às mesmas e às mudanças que possam ocorrer. Outro importante fator que afeta o comportamento do maciço rochoso são as descontinuidades que existem no mesmo. Estas tratam-se de superfícies de fraqueza que desagregam os blocos de matriz rochosa, ou rocha intacta, que constituem o maciço rochoso (Vallejo et al., 2004).

2.1.1 Caracterização e Descrição do Maciço Rochoso

O estudo das propriedades do maciço rochoso é de extrema importância pois vai permitir determinar qual o comportamento do mesmo perante determinadas condições às quais está sujeito ou pode vir a ser sujeito no futuro. Caracterizar e descrever o próprio maciço, o seu comportamento em condições ditas normais irá permitir que seja feita a classificação do mesmo, de modo a então determinar quais os procedimentos a seguir no caso de um projeto que venha a ser feito.

A caracterização e descrição do maciço rochoso trata de estudar as propriedades físicas e químicas da rocha, as quais estão interligadas entre si, mas também o estado em que este maciço se encontra *in situ*, ou seja quais as suas características no exato local a ser estudado, as quais por sua vez são completamente dependentes das propriedades físico-mecânicas e das condições em que o maciço se encontra.

2.1.1.1 Propriedades Físicas da Rocha

Neste capítulo serão abordadas especificamente as propriedades físicas das rochas, não confundindo que estas sejam as mesmas que as do maciço. Embora as propriedades físicas do maciço estejam claramente relacionadas com as da rocha que o compõe, também estão dependentes das condições em que o próprio se encontra. Desta forma, pode considerar-se que as propriedades físicas das rochas correspondem, geralmente, às propriedades físicas de um maciço rochoso composto de rocha sã.

Porosidade (η)

A porosidade corresponde à relação entre o volume total e o volume ocupado pelos poros, ou vazios na rocha e é representado em percentagem (%), como mostrado na Equação 2.1 (Vallejo et al., 2004).

$$\eta (\%) = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad 2.1$$

Em que:

η - Porosidade (%)

V_v – Volume de vazios (m³)

V – Volume total (m³)

Os vazios estão intrinsecamente relacionados com as características petrográficas da rocha como a composição mineralógica e o tamanho dos grãos, podendo corresponder até a microfissuras na matriz rochosa no caso de rochas cristalinas, embora não necessitem estar interligadas. Devido a este fator, a porosidade das rochas é dividida em “porosidade total” (η_p), que está relacionada com o volume quer dos vazios interligados, como as microfissuras, quer dos não interligados, como o caso de poros isolados, e “porosidade efetiva” (η_e) que está relacionada com o volume dos vazios conectados, os quais permitem a passagem da água, ou outros fluidos. A porosidade efetiva pode ser calculada a partir dos pesos saturado (W_{sat}) e seco (W_{seco}) da amostra (Vallejo et al., 2004). A Equação 2.2 trata-se da equação utilizada para o cálculo da porosidade efetiva.

$$\eta_e = \frac{W_{sat} - W_{seco}}{\gamma_w \cdot V} \quad 2.2$$

Em que:

η_e – Porosidade específica (%)

W_{sat} – Peso saturado (N)

W_{seco} – Peso seco (N)

γ_w – Peso específico da água (N/m³)

V – Volume total (m³)

A porosidade é, para além de uma característica da rocha, uma característica do próprio maciço e, tendo isto em conta, pode ser classificada como:

- **Porosidade primária**, a qual corresponde à porosidade criada durante a formação da própria rocha, e pode ser afetada por diversos fatores como o tamanho e a organização dos grãos minerais (Woessner & Poeter, 2020);
- **Porosidade secundária**, que, por sua vez, corresponde à porosidade do maciço relacionada com processos que ocorrem após a formação da rocha, como a fraturação e a alteração (Woessner & Poeter, 2020).

A porosidade, como percentagem, pode variar entre 0 e 90%, os valores normais encontram-se entre 15 a 30%, dependendo sempre do tipo de rocha constituinte do maciço, sendo de esperar que rochas carbonatadas ou vulcânicas possam ter valores

de porosidade mais altos, assim como rochas mais alteradas (Vallejo et al., 2004). Os valores normais para cada rocha encontram-se na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Valores normais para a porosidade de vários tipos de rocha (adaptado de Vallejo et al., 2004).

Tipo de Rocha	Porosidade (%)
Andesito	10 a 15
Anfibolito	-
Ardósia	0,1 a 1
Arenito	5 a 25
Basalto	0,1 a 2
Calcário	5 a 20
Carvão	10
Diorito	-
Dolerito	0,1
Dolomite	0,5 a 10
Gabro	0,1 a 0,2
Gesso	5
Giz	30
Gnaíse	0,5 a 1,5
Granito	0,5 a 1,5
Grauvaque	3
Mármore	0,3 a 2
Quartzito	0,1 a 0,5
Riólito	4 a 6
Sal	5
Tufo	14 a 40
Xisto	3

Peso Específico ou Peso Volúmico (γ)

Esta propriedade define-se como sendo o peso por unidade de volume, as unidades é unidade de força (Newton, Pascal, entre outras) por unidade de volume (Vallejo et al., 2004). A fórmula para o seu cálculo encontra-se na Equação 2.3.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad 2.3$$

Em que:

γ – Peso específico (N/m³)

W – Peso total da amostra de rocha (N)

V – Volume total da amostra de rocha (m³)

O peso específico pode ainda ser calculado com a densidade e a força gravítica, porém, dado que a força gravítica na Terra é igual a $9,8 \text{ cm/s}^2$, os valores de densidade e peso específico são muito semelhantes (Vallejo et al., 2004).

Esta propriedade, para além de ser afetada pelo peso e pelo volume da amostra, pode ser afetada ainda pelo teor de água, podendo ser calculado o Peso Específico Seco (γ_d), que, tal como o nome indica, se trata do peso específico da rocha com um baixo teor em água e é considerado o mais representativo, sendo calculado como mostra na Equação 2.4 (Vallejo et al., 2004):

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad 2.4$$

Em que:

γ_d – Peso específico seco (N/m^3)

W_s – Peso total da amostra seca na estufa (N)

V – Volume total da amostra de rocha (m^3)

Existem valores tabelados para o peso específico das rochas mais comuns, apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Valores normais para o peso específico de vários tipos de rochas (adaptado de Vallejo et al., 2004).

Tipo de Rocha	Peso Específico (N/m^3)
Andesito	21600 a 23000
Anfibolito	28400 a 29400
Ardósia	24500 a 26500
Arenito	22600 a 25500
Basalto	26500 a 28400
Calcário	22600 a 25500
Carvão	9800 a 19600
Diorito	26500 a 27900
Dolerito	28400
Dolomite	24500 a 25500
Gabro	29400 a 30400
Gesso	22600
Giz	16700 a 22600
Gnaisse	26500 a 29400
Granito	25500 a 26500
Grauvaque	27500
Mármore	25500 a 27500
Quartzito	25500 a 26500

Tipo de Rocha	Peso Específico (N/m³)
Riólito	23500 a 25500
Sal	20600 a 21600
Tufo	18600 a 22600
Xisto	24500 a 27500

Permeabilidade (k)

Esta propriedade está relacionada com a capacidade do material rochoso permitir a movimentação da água na sua matriz. Geralmente as rochas apresentam valores de permeabilidade muito baixos, dado que a água se movimenta através de fissuras e poros que existam na rocha, ou seja, a permeabilidade está relacionada com a porosidade da própria rocha (Vallejo et al., 2004).

A permeabilidade é representada pelo Coeficiente de Permeabilidade, também denominado por Condutividade Hidráulica (k), expressa em m/s e calculada com a Equação 2.5:

$$k = K \frac{\gamma_w}{\mu} \quad 2.5$$

Em que:

k – Condutividade Hidráulica (m/s)

K – Permeabilidade Intrínseca (m²)

γ_w – Peso Específico da Água (N/m³)

μ – Viscosidade da Água (N.s/m² ou Pa.s)

Esta propriedade é afetada, não só pela porosidade mas também pelos estados de tensão aos quais está sujeita a rocha, dado que, embora um aumento da tensão de compressão obrigue a que as fissuras se fechem, diminuindo temporariamente a permeabilidade, um maior aumento na tensão de compressão pode provocar a abertura de novas fissuras, aumentando a permeabilidade. Outro fator que a afeta é também a pressão da água, que ao circular pelas fissuras causa um aumento da pressão podendo provocar a criação de novas fissuras (Vallejo et al., 2004).

Os valores de permeabilidade embora sejam baixos variam bastante entre diferentes tipos de rocha, como mostra a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Valores normais para a condutividade hidráulica de vários tipos de rochas (adaptado de Vallejo et al., 2004).

Tipo de Rocha	Condutividade Hidráulica (m/s)
Arenito	$10^{-5} - 10^{-10}$
Ardósia	$10^{-11} - 10^{-13}$
Calcário e Dolomite	$10^{-6} - 10^{-12}$
Granito	$10^{-9} - 10^{-12}$
Xisto	$10^{-7} - 10^{-8}$
Rochas Metamórficas	$10^{-9} - 10^{-12}$
Rochas Vulcânicas	$10^{-7} - 10^{-12}$
Sal	$< 10^{-11} - 10^{-13}$

2.1.1.2 Propriedades Mecânicas da Rocha

Como foi mencionado anteriormente, as propriedades mecânicas das rochas dependem das propriedades físicas. Porém, tal como no caso das propriedades físicas, há diferenças nas propriedades da rocha e do maciço rochoso. As tensões e outras características que afetam um bloco de rocha intacta que é utilizado para os diversos ensaios laboratoriais, são diferentes daquelas a que a rocha no maciço está sujeita, podendo observar-se um comportamento de alguma forma diferente. Ainda assim, as propriedades mecânicas do maciço rochoso dependem das propriedades mecânicas da rocha que o compõe, sendo destas segundas que este capítulo retrata, especificamente da Resistência à Compressão Simples.

Outras importantes propriedades mecânicas são os Módulos de Deformabilidade e de Elasticidade e o Ângulo de Atrito.

Resistência à Compressão Simples (σ_c)

A resistência à compressão simples, também denominada por resistência à compressão uniaxial, corresponde ao esforço máximo que a rocha consegue suportar quando submetida a compressão uniaxial antes de quebrar. Trata-se de uma importante propriedade e, no estudo das rochas e do maciço rochoso, é a mais comumente determinada no que toca à caracterização das propriedades mecânicas (Vallejo et al., 2004).

É, geralmente, determinada em laboratório com o Ensaio de Compressão Uniaxial ou com o Ensaio de Carga Pontual. Existem, porém, outros métodos que permitem estimar o valor da resistência à compressão, alguns dos quais podendo ser realizados em campo: o ensaio do Martelo de Schmidt, utilizado para determinar a resistência do

maciço rochoso *in situ* bem como descontinuidades que nele se encontrem, ou a correlação entre o comportamento do maciço quando submetido a testes de campo, nos quais se faz uso do martelo de geólogo e outros instrumentos, e os valores de resistência aos quais correspondem. Esta correlação entre comportamento *in situ* e os valores de resistência pode ser observada na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, localizada mais à frente no documento.

Módulo de Deformabilidade e Módulo de Elasticidade

A deformabilidade das rochas corresponde à capacidade que uma rocha tem de se deformar quando é aplicada algum tipo de tensão à mesma, sem esta sofrer rotura. A deformabilidade pode expressar-se por duas constantes, o **Módulo de Young**, E , que se trata da relação linear elástica entre a força aplicada e a deformação que ocorreu na direção da aplicação dessa mesma força, e o **Coeficiente de Poisson**, ν , que se trata da relação entre a deformação transversal e a deformação axial (Vallejo et al., 2004). Nas Equações 2.6 e 2.7 encontram-se estas relações.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{ax}} \quad 2.6$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{ax}} \quad 2.7$$

Em que:

E – módulo de Young (N/m²)

ν – Coeficiente de Poisson

Σ – Força aplicada (N/m²)

ε_{ax} – Deformação axial

ε_t – Deformação transversal

2.1.1.3 Descontinuidades

O maciço rochoso, para além de ser influenciado pelas características da própria rocha, é influenciado também pelas características das descontinuidades que o afetam, a sua quantidade, o espaçamento entre elas, entre outros. Assim, é importante para a caracterização e classificação do maciço, uma caracterização das descontinuidades que nele se encontram.

2.1.1.3.1 Tipos de Descontinuidades

Uma descontinuidade trata-se de um plano de separação entre blocos do maciço rochoso. Podem ser divididas em sistemáticas ou singulares, dependendo se ocorrem em famílias ou isoladamente, e planares ou lineares, dado que existem descontinuidades que se representam por um plano ou apenas por um eixo. Na

Tabela 2.4 encontra-se um resumo das descontinuidades que podem ser encontradas e onde se encaixam (Vallejo et al., 2004).

Tabela 2.4 Tipos de descontinuidades (adaptado de Vallejo et al., 2004).

Descontinuidades	Sistemáticas	Singulares
Planares	Planos de Estratificação Planos de Laminação Diáclases Planos de Xistosidade	Falhas Diques e Filões Contactos Geológicos
Lineares	Interseções de Descontinuidades Lineações	Eixos de Dobramento

Diáclases

Um dos mais comuns tipos de descontinuidades são as diáclases, que são superfícies de fraturação da rocha na qual não ocorreu movimento dos blocos rochosos, podendo ser encontrados em qualquer tipo de maciço rochoso (Vallejo et al., 2004).

As diáclases podem ter várias origens: tectónica, por compressão em rochas ígneas após a intrusão das mesmas e por descompressão.

Planos de Estratificação

Este tipo de descontinuidades ocorre especialmente em rochas sedimentares e em rochas metamórficas, correspondendo à separação entre diferentes estratos (Vallejo et al., 2004).

Planos de Laminação e Planos de Xistosidade

As descontinuidades destes dois tipos são semelhantes dado que fazem a separação entre as finas lâminas que podem existir na rocha, especialmente em rocha com um grão mais fino. Planos de laminação ocorrem em rochas sedimentares e planos de xistosidade em rochas metamórficas (Vallejo et al., 2004).

Contactos Geológicos, Diques e Filões

Como o próprio nome indica, estas descontinuidades correspondem aos planos de separação entre litologias ou rochas diferentes, sendo particularmente importantes em rochas ígneas, dado que em rochas sedimentares e metamórficas podem corresponder aos planos de estratificação (Vallejo et al., 2004).

Relacionado com os contactos geológicos encontram-se também os diques e os filões, os quais correspondem a intrusões no maciço rochoso, geralmente por outras descontinuidades e formam eles mesmos planos de fraqueza (Vallejo et al., 2004).

Falhas

Assim como as diáclases, as falhas também são planos de fratura no maciço rochoso, porém, neste caso, apresentam movimento entre os blocos rochosos. Por vezes, dependendo do tamanho e do tipo da estrutura, pode não ser possível identificar um plano de rotura claro (Vallejo et al., 2004).

2.1.1.3.2 Caracterização das Descontinuidades

Após determinar o tipo de descontinuidade é também necessário observar as suas características dado que estas irão determinar o seu comportamento e a forma como afetam o maciço rochoso, em particular a sua estabilidade. Assim, deve ter-se em atenção a orientação das descontinuidades, a alteração presente nas mesmas, a sua quantidade e a relação entre si e as suas características. Este é um trabalho feito comumente durante saídas de campo a locais com taludes em rocha dado que é nestas que é possível melhor observar as descontinuidades.

Atitude das Descontinuidades

A atitude das descontinuidades é um importante detalhe na descrição das descontinuidades, dado que, para além de definir os formatos dos blocos rochosos, também influencia os tipos de rotura que podem vir a afetar o maciço durante uma obra (Vallejo et al., 2004).

A atitude das descontinuidades é composta por 2 características das mesmas: a direção do plano de descontinuidade e a inclinação, bem como a direção para onde inclina. A direção do plano da descontinuidade trata-se do ângulo que a direção do plano faz com o Norte, na Figura 2.1 encontra-se representada por δ . A inclinação da

descontinuidade trata-se de quanto ela inclina em relação à horizontal, na qual há uma variação de 0° a 90° , onde 0° corresponde à horizontal e 90° à vertical.

A atitude das descontinuidades pode ser representada como referida acima, usando a direção do plano e a inclinação, ou usando a inclinação e a direção de inclinação. Este segundo método é mais comumente utilizado no contexto da geologia aplicada à engenharia, sendo conhecido como a sua designação em inglês *Dip/Dip Direction*. A inclinação é medida como descrito acima e a direção da inclinação, como o nome indica é a direção para onde inclina a descontinuidade, variando entre 0° até 360° , sendo que ambos correspondem a uma inclinação para Norte (N), 90° corresponde a uma inclinação para Este (E), 180° a uma inclinação para Sul (S) e 270° a uma inclinação para Oeste (W) (Vallejo et al., 2004).

Na Figura 2.1 encontra-se uma representação dos ângulos a medir.

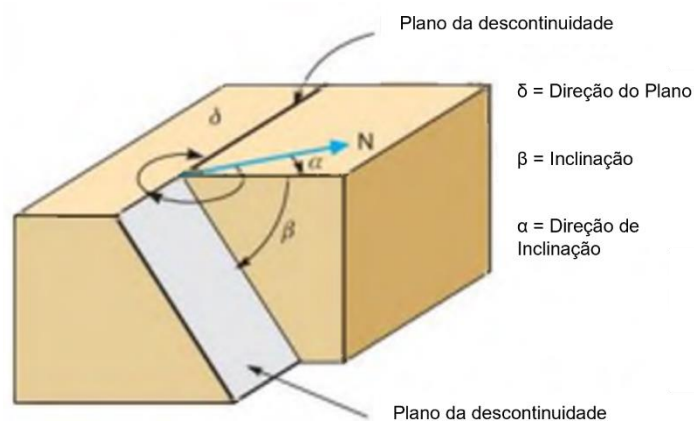


Figura 2.1 Ângulos medidos numa descontinuidade (retirado de Vallejo et al., 2004).

A atitude ajuda também a definir as famílias de descontinuidades, estas famílias são de um conjunto de várias descontinuidades com uma atitude e características semelhantes e para as definir é necessária a medição de várias descontinuidades. Após a medição em campo deve ser feita uma representação gráfica das descontinuidades que pode ser realizada por projeção estereográfica, quer feita à mão ou com recurso a *softwares* como o *Dips* (Vallejo et al., 2004). O *Dips* trata-se de um software utilizado no tratamento de dados geológicos, nomeadamente a dados de orientação das estruturas e superfícies geológicas, fazendo uso da projeção estereográfica para analisar a estabilidade de taludes, túneis de modo a verificar pontos críticos e orientar as decisões no planeamento e execução dos projetos em materiais rochosos. Quando feita à mão é necessária a utilização de simbologias apropriadas de modo a entender de forma

simples o que cada um representa. Na Figura 2.2 encontra-se a simbologia definida pela ISRM.

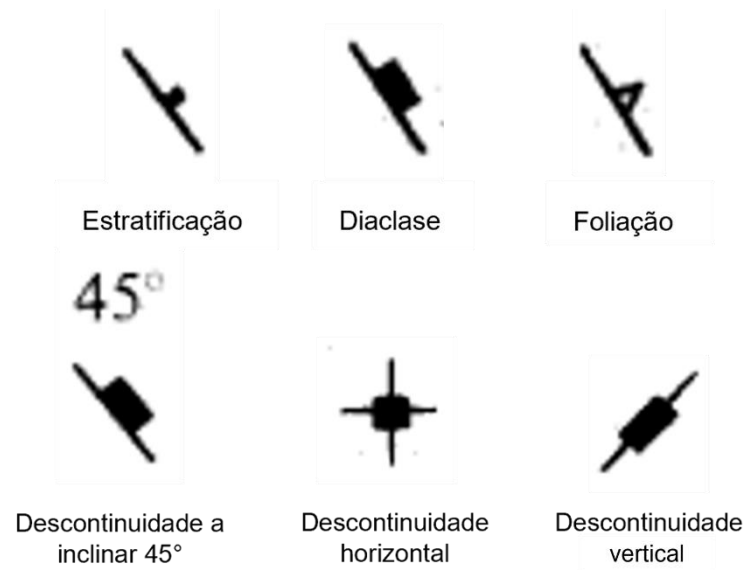


Figura 2.2 Simbologia utilizada na representação de descontinuidades em mapa (ISRM, 1978).

Espaçamento das Descontinuidades

O espaçamento entre as descontinuidades trata da distância, medida na perpendicular, entre duas descontinuidades de uma mesma família.

É uma característica crucial dado que influencia o comportamento do maciço rochoso e define o tamanho que os blocos desagregados virão a ter. Um espaçamento baixo diminui em muito a resistência do maciço, enquanto um espaçamento maior não o influenciará tão negativamente. Para além de afetar o tamanho dos blocos e a resistência do maciço, também afeta a permeabilidade do mesmo, dado que a permeabilidade depende de poros e fissuras, e aumenta com o aumento do número de descontinuidades (Vallejo et al., 2004).

Assim, é possível fazer uma classificação das descontinuidades tendo em conta o quão espaçadas são umas das outras, de acordo com valores e termos tabelados. Na Tabela 2.5 é possível observar esta classificação.

Tabela 2.5 Descrição das descontinuidades atendendo ao espaçamento entre si (ISRM, 1978).

Espaçamento (mm)	Descrição
< 20	Extremamente Próximas
20 – 60	Muito Próximas
60 – 200	Próximas
200 – 600	Moderadamente Afastadas
600 – 2 000	Afastadas
2 000 – 6 000	Muito Afastadas
> 6 000	Extremamente Afastadas

Persistência das Descontinuidades

A persistência, referido também como “continuidade”, de uma descontinuidade trata-se da extensão do plano de descontinuidade, e embora seja um parâmetro de suma importância, a sua quantificação é difícil dado que nem sempre é possível observar uma descontinuidade em toda a sua extensão. As descontinuidades mais contínuas tratam-se geralmente de descontinuidades singulares, como falhas, diques e filões (Vallejo et al., 2004). Na Tabela 2.6 é possível observar a classificação que é dada às descontinuidades tendo em conta a sua continuidade.

Tabela 2.6 Descrição das descontinuidades atendendo à sua persistência (ISRM, 1978).

Persistência (m)	Descrição
< 1	Muito Pouco Contínua
1 – 3	Pouco Contínua
3 – 10	Medianamente Contínua
10 – 20	Contínua
> 20	Muito Contínua

Rugosidade das Descontinuidades

A medição da rugosidade das descontinuidades é de elevada relevância para a determinação da resistência ao corte, sendo que esta última aumenta com o aumento da rugosidade (Vallejo et al., 2004).

A descrição da rugosidade das descontinuidades é feita com auxílio de um ábaco, mostrado na Tabela 2.7, no qual se encontram diversos perfis de rugosidade com os quais se pode comparar o perfil de rugosidade encontrado no campo. Cada perfil pode ser feito corresponder a nove diferentes nomenclaturas, as quais se encontram na Figura 2.3, dependendo se falamos de um perfil numa pequena, média ou grande escala.

Tabela 2.7 Descrição das descontinuidades atendendo ao seu perfil de rugosidade ISO.

Número do Perfil	Pequena Escala (milímetros)	Média Escala (centímetros)	Grande Escala (metros)
	Perfil na Figura = 10 mm	Perfil na Figura = 100 mm	Perfil na Figura = 1 000 mm
1 a 3	Estriada (sl)	Planar (pl)	Retilínea
4 a 7	Lisa (sm)	Ondulada (un)	Curva
8 a 10	Rugosa (r)	Dentada (st)	Ondulada

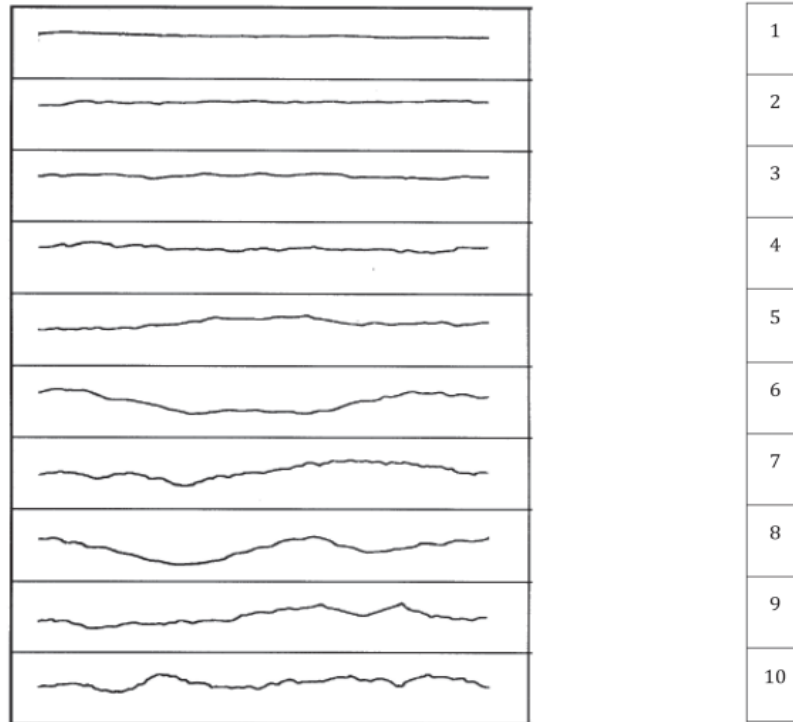


Figura 2.3 Perfis de rugosidade (ISO 14689_2017 (E))

Abertura das Descontinuidades

A abertura de uma descontinuidade corresponde ao espaço, medido na perpendicular, entre as duas paredes da mesma quando não existe preenchimento e, tal como a rugosidade, é importante na determinação da resistência ao corte dado que uma maior abertura irá causar uma diminuição da resistência (Vallejo et al., 2004).

A descrição desta característica deve ser feita, tal como nos casos anteriores, com o auxílio de uma nomenclatura específica, correspondente a determinados intervalos de valores de abertura. Esta nomenclatura encontra-se na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 Descrição das descontinuidades atendendo à abertura entre as paredes da própria descontinuidade (ISRM, 1978).

Abertura (mm)	Descrição	
< 0,1	Muito Apertadas	Fechadas
0,1 – 0,25	Apertadas	
0,25 – 0,5	Parcialmente Abertas	
0,5 – 2,5	Abertas	Abertas
2,5 – 10	Moderadamente Largas	
>10	Largas	
10 - 100	Muito Largas	Muito Abertas
100 - 1 000	Extremamente Largas	
> 1 000	Cavernosas	

2.1.1.4 Descrição do Maciço Rochoso

A descrição do maciço rochoso trata da descrição *in situ* do maciço, especialmente da sua alteração, fraturação e resistência. Esta caracterização *in situ* é de elevada importância dado que, num estudo geológico-geotécnico, são os dados quanto às condições do maciço as mais importantes. Embora as características das rochas ajudem a caracterizar o maciço, é necessário que haja uma descrição profunda do maciço.

Alteração

A alteração do maciço rochoso trata do quão afetado o maciço se encontra devido, entre outros, à ação dos agentes de meteorização. De acordo com a ISRM (*International Society for Rock Mechanics*), a descrição deve ser feita utilizando os termos apresentados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 Descrição da alteração do maciço rochoso (ISRM, 1981).

Classificação	Termo	Descrição
W1	São	Sem quaisquer sinais de alteração visíveis no material rochoso; ligeira descoloração na superfície das maiores descontinuidades pode ocorrer.
W2	Pouco Alterado	A descoloração indica a alteração do material rochoso e das superfícies de descontinuidade. O material rochoso pode apresentar-se completamente descolorado e ligeiramente mais fraco do que na condição sã.
W3	Medianamente Alterado	Menos de metade do material rochoso encontra-se decomposto e/ou desintegrado num solo. Encontram-se núcleos de rocha sã ou descolorada.
W4	Muito Alterado	Mais de metade do material rochoso encontra-se decomposta e/ou desintegrada num solo. Encontram-se núcleos de rocha sã ou descolorada.
W5	Decomposta	Todo o material rochoso se encontra decomposto ou desintegrado num solo. A estrutura do maciço encontra-se maioritariamente intacta.

Fraturação

Esta característica do maciço está relacionada com o quão fraturado ele se encontra, correspondendo ao Espaçamento das Descontinuidades, estando a descrição na Tabela 2.10.

Tabela 2.10 Descrição da fraturação do maciço rochoso e a correspondência com os valores de espaçamento entre descontinuidades no maciço (ISRM, 1981).

Espaçamento (cm)	Grau	Descrição
> 200	F1	Muito Afastadas
60 – 200	F2	Afastadas
20 – 60	F3	Medianamente afastadas
6 – 20	F4	Próximas
< 6	F5	Muito Próximas

Resistência

A resistência do maciço rochoso trata-se da resistência deste à compressão simples e é determinada através de ensaios laboratoriais como o Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial, entre outros. Na Tabela 2.11 encontram-se os graus de resistência bem como a descrição e valores de resistência à compressão a que correspondem.

Tabela 2.11 Descrição da resistência do maciço rochoso e a correspondência com os valores de resistência à compressão simples (ISRM, 1981).

Grau	Descrição	Intervalos de Resistência (Mpa)
S1	Muito Resistente	> 200
S2	Resistente	60 – 200
S3	Moderadamente Resistente	20 – 60
S4	Pouco Resistente	6 – 20
S5	Muito Pouco Resistente	< 6

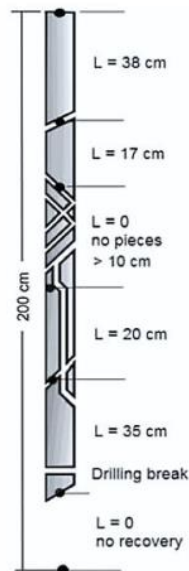
2.1.2 Classificações Geomecânicas do Maciço Rochoso

A classificação do maciço rochoso pode ser feita tendo em conta determinadas características, como a quantidade de descontinuidades ou o tamanho dos blocos, ou tendo em conta várias destas características e fazendo uma junção de modo a classificar o maciço num modo geral. Neste subcapítulo será feita uma abordagem a três destas classificações, o RQD e o GSI que estão relacionados com as descontinuidades, e o RMR que pondera várias das características do próprio maciço, para além de das descontinuidades.

2.1.2.1 “Rock Quality Designation” (RQD)

Desenvolvida por Deere em 1967, o RQD dá uma estimativa aproximada da qualidade da rocha em sondagens. Trata-se da percentagem de amostras rochosas intactas com mais de 10 cm numa manobra, calculando-se usando a Equação 2.8, do modo exemplificado na

Figura 2.4 (Hoek, 2006).



$$RQD = \frac{38 + 17 + 20 + 35}{200} = 55 \%$$

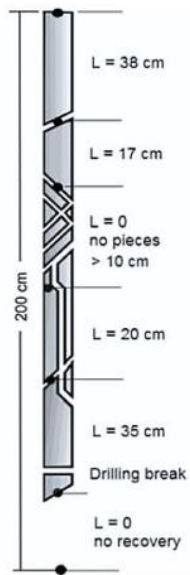
$$RQD = \frac{\sum amostras\ intactas > 10\ cm}{comprimento\ total\ do\ carote} \times 100 \qquad 2.8$$

Figura 2.4 Exemplo do cálculo do RQD (retirado de Hoek, 2006).

Assim, a qualidade da rocha pode ser classificada entre muito má e muito boa, dependendo da sua percentagem de RQD, como mostra a Tabela 2.12.

Tabela 2.12 Classificação do maciço de acordo com Barton (adaptada de Hoek, 2006).

RQD (%)	Qualidade
< 25	Muito Má
25 – 50	Má
50 – 75	Mediana
75 – 90	Boa
90 – 100	Muito Boa



$$RQD = \frac{38 + 17 + 20 + 35}{200} = 55 \%$$

2.1.2.2 “Geological Strength Index” (GSI)

O GSI, ou *Geological Strength Index*, trata de um valor que, combinado com as propriedades da rocha intacta pode dar uma estimativa da qualidade da resistência do maciço rochoso em questão. Foi introduzido por Hoek em 1994, já tendo sofrido algumas modificações. Para a determinação deste índice é utilizado um ábaco, mostrado na Figura 2.5, no qual o valor do GSI varia entre 0 e 100.

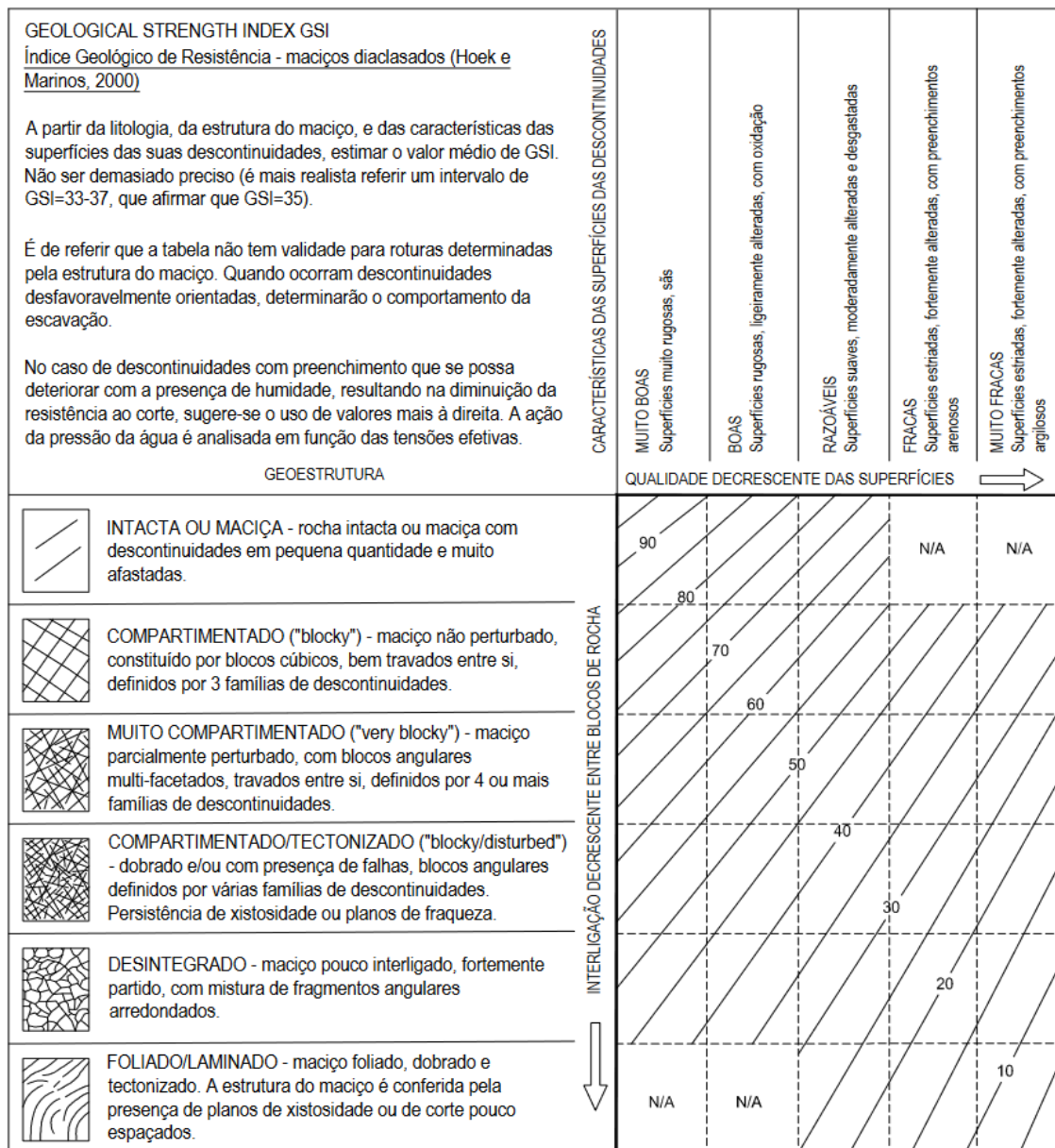


Figura 2.5 Ábaco para a classificação GSI (retirado de Hoek, 2006).

2.1.2.3 “Rock Mass Rating” (RMR)

Bieniawski, em 1976, desenvolveu a classificação geomecânica RMR, tendo esta sido refinada durante os anos, até 1989, que corresponde à classificação RMR usada nos dias de hoje. No cálculo do RMR básico são usados cinco parâmetros: a resistência à compressão uniaxial da rocha, o RQD, o espaçamento entre descontinuidades, as características das descontinuidades e as características do fluxo de água. Porém, por vezes, é necessária a utilização de uma correção da orientação das descontinuidades de acordo com o túnel ou obra a estudar. Ao aplicar esta classificação deve ser feita uma divisão estrutural, sendo esta feita, geralmente, por estruturas importantes, como falhas ou contactos entre duas diferentes rochas, pois, por vezes, uma diferença significativa das características estudadas podem também justificar uma divisão. Na Tabela 7.1 (Anexo 7.1) pode verificar-se as características e a respetiva ponderação, sendo que no final deve fazer-se a soma de todas as ponderações, obtendo-se um valor entre 0 e 100 (Bieniawski, 1989).

Como referido, embora nem sempre seja necessário, pode ser feita uma correção tendo em conta a orientação das descontinuidades e a sua relação com o alinhamento do túnel. Dependendo de estarem paralelas ou perpendiculares em relação ao túnel, as descontinuidades podem afetar positivamente ou negativamente a escavação e a manutenção do túnel, podendo obrigar à utilização de mais suportes (Bieniawski, 1989). Na Tabela 2.13 encontra-se a classificação da orientação das descontinuidades com base na sua relação com o alinhamento do túnel e, na Tabela 2.14, a penalização que a orientação pode ter tendo em conta o tipo de obra e a relação da atitude das descontinuidades com o alinhamento da obra.

Tabela 2.13 Classificação da orientação das descontinuidades em relação ao alinhamento da obra (adaptado de Bieniawski, 1989).

Direção perpendicular ao eixo do túnel				Direção paralela ao eixo do túnel		Inclinação 0 – 20°
Abertura do túnel no sentido da inclinação		Abertura do túnel no sentido inverso da inclinação		Inclinação 45 – 90°	Inclinação 20 – 45°	
Inclinação 45 – 90°	Inclinação 20 – 45°	Inclinação 45 – 90°	Inclinação 20 – 45°			
Muito Favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito Desfavorável	Razoável	Razoável

Tabela 2.14 Penalização que a orientação das descontinuidades pode ter, dependendo do tipo de obra e da orientação das descontinuidades em relação ao alinhamento da mesma (adaptado de Bieniawski, 1989).

Orientação das Descontinuidades		Muito Favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito Desfavorável
Pontuação	Túneis e Minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

O valor conseguido, depois da soma, pode ter correspondência com a classificação que se mostra na Tabela 2.15.

Tabela 2.15 Classificação do maciço rochoso de acordo com Bieniawski (1989).

RMR	Classe	Descrição
81 – 100	I	Muito Boa
61 – 80	II	Boa
41 – 60	III	Regular
21 – 40	IV	Fraca
≤ 20	V	Muito Fraca

A classificação de Bieniawski e o cálculo do RMR foram criados para, além de classificar o maciço rochoso de uma forma quantitativa, poder dar ideias bases dos tipos de suporte que devem ser utilizados durante e após a escavação de um túnel para cada uma das classes de maciços (Bieniawski, 1989). A Tabela 7.2 (Anexo 7.1) tem estes suportes e métodos de escavação pré-definidos e que podem servir como um plano base.

2.2 Mecânica dos Solos

O estudo da mecânica dos solos, assim como da mecânica das rochas, adveio da necessidade de melhor entender as características do material onde realizamos escavações e onde se localizam as fundações dos edifícios à nossa volta.

Os solos também são de elevada importância, dado que são resultado da meteorização das rochas, porém têm propriedades completamente diferentes das rochas que lhes deram origem.

2.2.1 Descrição e Caracterização dos Solos

Os diferentes tipos de solos podem ter três diferentes origens: física, química e biológica, dependendo dos processos que poderão ter estado envolvidos. Para além dos processos envolvidos na formação do solo, este pode ser classificado também pelo facto de ter sofrido transporte ou não, podendo ser diferenciado entre um solo residual, que não sofreu transporte, ou um solo transportado, que, tal como o nome indica, sofreu transporte (Vallejo et al., 2004). No caso deste relatório e dos projetos relatados, são de especial importância os solos residuais, como será visto no Capítulo 4.

2.2.1.1 Granulometria dos Solos

Uma das mais importantes características de um solo é o tamanho dos grãos que o compõem, ou seja, a sua granulometria. O tamanho dos grãos pode variar entre vários centímetros até muito abaixo de um milímetro (Vallejo et al., 2004). Na Tabela 2.16 encontra-se a nomenclatura utilizada pela AASHTO (2021) para os diferentes tamanhos de grãos que podem constituir um solo.

Tabela 2.16 Nomenclatura utilizada na descrição dos solos, de acordo com a granulometria das partículas que o constituem (AASHTO, 2021).

Nomenclatura		Tamanho (mm)
Cascalho		60 – 2,0
Areia	Grosseira	2,0 – 0,425
	Fina	0,425 – 0,075
Silte		0,075 – 0,005
Argila		< 0,005

Para identificar quais as percentagens de cada granulometria num solo, deve ser feita a análise granulométrica por via seca, no caso de materiais de tamanho superior a 0,075 mm, ou via húmida, quando apresentam tamanho menor. Com os dados adquiridos nesta análise é possível então fazer uma curva granulométrica que irá ajudar na caracterização do próprio solo (Vallejo et al., 2004).

2.2.1.2 Plasticidade

Outra importante característica dos solos é a sua plasticidade, a qual se trata da consistência do solo tendo em conta o seu conteúdo em água, através do cálculo da humidade, dividindo o peso da água de um solo pelo peso seco do mesmo solo (Vallejo et al., 2004).

De modo a facilitar esta classificação foram definidos três limites/conceitos por Atterberg: o limite de consistência, que separa os comportamentos sólido e semissólido, o limite de plasticidade, W_P , que separa o estado semissólido do plástico, e, por fim, o limite de liquidez, W_L , que separa o plástico do semilíquido (Vallejo et al., 2004).

Ao subtrair o limite de plasticidade ao limite de liquidez obtém-se o Índice de Plasticidade, ou seja, o intervalo de valores de humidade que estão na passagem de um material de um estado semissólido para um estado semilíquido. Com este índice foi criada, por Casagrande, uma carta de plasticidade, representada na Figura 2.6, na qual está representada o índice de plasticidade e o limite de liquidez. Casagrande, após vários testes e estudos práticos, chegou à conclusão de que quando o limite de liquidez de um solo for maior que 50, este corresponde a um solo de alta plasticidade, enquanto para valores abaixo de 50 se trata de um solo de baixa plasticidade. Para além de definir esta divisão entre alta e baixa plasticidade, representada pela "Linha B", acrescentou uma "Linha A", uma linha paralela à direção em que os tipos solos estão organizados. Esta carta porém só pode ser utilizada em caso de materiais com granulometria fina (Vallejo et al., 2004).

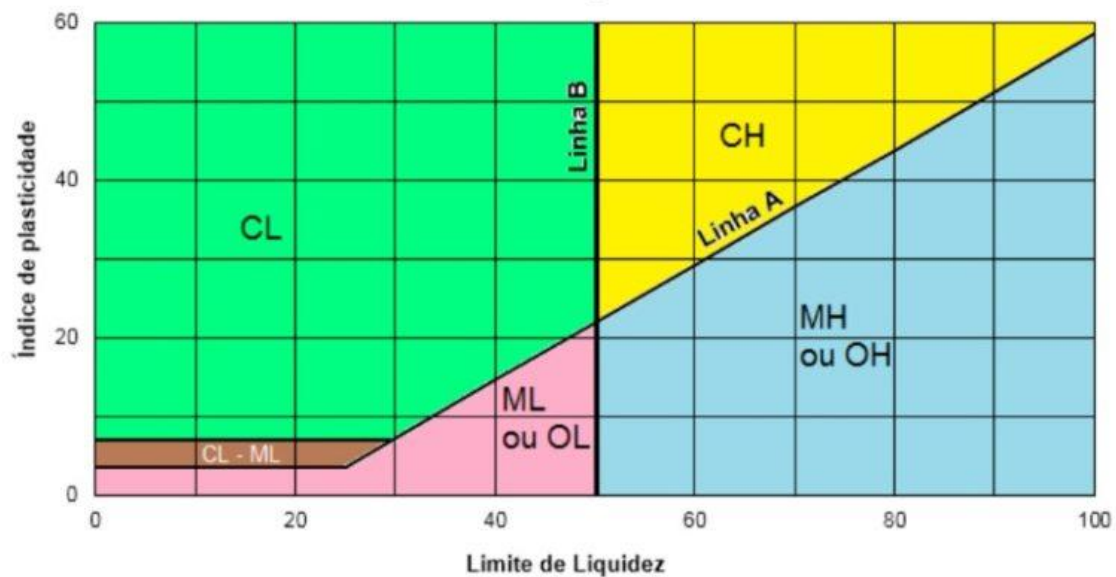


Figura 2.6 Gráfico da Carta de Plasticidade de Casagrande.

Como é possível observar no Figura 2.6, a divisão com as duas linhas cria uma divisão entre os tipos de solo, argilas e siltes ou solo orgânico. Assim, os solos são divididos em: argilas de baixa plasticidade (CL), argilas de alta plasticidade (CH), siltes ou solos orgânicos de baixa plasticidade (ML-OL), siltes ou solos orgânicos de alta plasticidade (MH-OH), e ainda uma zona ambígua em que ocorre uma mistura entre argilas e siltes de baixa plasticidade (CL-ML) (Vallejo et al., 2004).

2.2.1.3 Propriedades Físicas dos Solos

No Subcapítulo 2.1.1.1 foram mencionadas várias das propriedades físicas das rochas, como a porosidade e o peso específico. Estas são também propriedades dos solos.

Porosidade (η) e Índice de Vazios (e)

Como visto antes, a porosidade trata-se da relação entre o volume de vazios e o volume total da amostra, ou o volume aparente. Para além do método de cálculo apresentado na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, a porosidade está relacionada com o índice de vazios, ou seja, a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos (Vallejo et al., 2004). Nas Equações 2.9 e 2.10 encontra-se a relação entre estas duas propriedades.

$$\eta = \frac{e}{1 + e} \quad 2.9$$

$$e = \frac{\eta}{1 - \eta} \quad 2.10$$

Em que:

η – Porosidade (%)

e – Índice de Vazios (%)

Embora seja possível usar ambos, no caso dos solos é mais comum o uso do Índice de Vazios, o qual apresenta um valor entre 0,30 e 1,30 na maioria dos casos, porém pode chegar a 3,0 no caso de um solo com muita matéria orgânica (Vallejo et al., 2004).

Peso Específico, Humidade e Grau de Saturação

Embora nos capítulos anteriores tenha sido abordado apenas o Peso Específico Aparente e o Peso Específico Aparente Seco, outros são igualmente importantes, nomeadamente na caracterização dos solos, entre os quais:

- **Peso Específico das Partículas**, representado por G , corresponde ao peso específico das diversas partículas nos solos, o seu valor varia entre 25 e 27 kN/m³, podendo chegar a 30-31 kN/m³ no caso de solos vulcânicos com partículas de ferro;
- **Peso Específico Aparente Saturado**, γ_{sat} , é a relação entre o peso dos sólidos e da água nos vazios, com o volume aparente da amostra, podendo o seu valor variar entre 16 e 21 kN/m³, atingindo valores mais baixos em situações específicas;
- **Peso Específico da Água**, γ_w , com um valor fixo de 9,8 kN/m³.

Estas propriedades podem todas elas ser relacionadas entre si e, ainda, relacionar-se com outras propriedades como o Teor em Água (ω), a relação entre o peso da água na amostra e o peso das suas partículas sólidas e o Grau de Saturação (S), a relação entre o peso da água na amostra e o peso de água que teria caso estivesse saturada (Vallejo et al., 2004). As Equações 2.11, 2.12, 2.13 e 2.14 são várias das equações nas quais se relacionam estas propriedades.

$$\omega = \frac{S \cdot e}{G} \quad 2.11$$

$$\gamma_d = \frac{G}{1 + e} \quad 2.12$$

$$\gamma_{ap} = \gamma_d(1 + \omega) \quad 2.13$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G + e \cdot \gamma_w}{1 + e} \quad 2.14$$

Em que:

ω – Teor em água (%)

S – Grau de Saturação (%)

e – Índice de Vazios (%)

G – Peso específico das partículas (N/m³)

γ_d – Peso específico seco (N/m³)

γ_{ap} – Peso específico aparente (N/m³)

γ_{sat} – Peso específico saturado (N/m³)

γ_w – Peso específico da água (N/m³)

2.2.1.4 *Propriedades Mecânicas dos Solos*

Embora tenham comportamentos diferentes das rochas, como foi referido anteriormente algumas propriedades podem ser semelhantes. Isto inclui as propriedades mecânicas. A resistência à compressão e os módulos de deformabilidade, calculados com auxílio da Tensão ao Corte são propriedades similares àsquelas apresentadas no Subcapítulo 2.1.1.2.

2.2.1.5 *Minerais de Argila*

Como referido, as argilas são uma importante componente granulométrica dos solos, dado que afetam em muito o seu comportamento, nomeadamente quando associadas com água. Porém os denominados Minerais de Argila são um grupo de minerais muito particular, tratando-se de silicatos hidratados de alumínio, dentro do

grupo dos filossilicatos. São dos minerais mais comuns à superfície da Terra, sendo parte da maioria dos solos e rochas sedimentares (Vallejo et al., 2004).

Como filossilicatos são caracterizados por terem uma estrutura composta por camadas, e estas podem diferenciar os diferentes grupos dentro dos minerais de argila, dependendo da quantidade de camadas e da sua composição. Os minerais de argila têm como origem a alteração de outros minerais, como as micas e os feldspatos (Whitlow, 1995).

Grupo do Caulino

Composto por vários minerais entre os quais a caulinite e a haloisite com camadas tetraédricas com Si^{4+} intercaladas com camadas octaédricas com Al^{3+} , com uma relação 1:1 entre as camadas, ou seja por cada camada tetraédrica há uma camada octaédrica, no caso do caulino. A haloisite tem uma estrutura muito semelhante, porém entre as camadas encontram-se moléculas de água (Vallejo et al., 2004). Na Figura 2.7 encontram-se uma representação das estruturas de ambos os minerais, caulino, à esquerda, e haloisite, à direita.

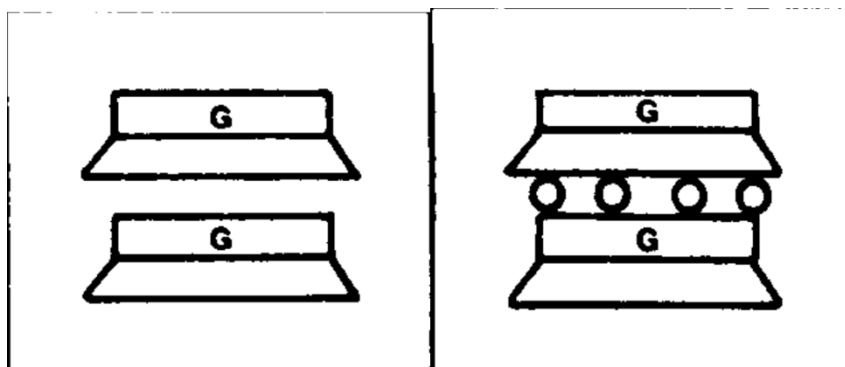


Figura 2.7 Estrutura dos minerais caulinite (à esquerda) e haloisite (à direita). A letra “G” representa a camada tetraédrica com Si^{4+} (retirado de Whitlow, 1995).

São o produto da alteração dos minerais como a ortoclase, a qual por sua vez é comum em rochas graníticas. Os caulinos tratam-se assim de minerais com uma estrutura floculada, empilhando-se uns em cima dos outros (Whitlow, 1995).

Grupo da Ilite

O mais importante mineral deste grupo é a própria ilite, produto da alteração de micas como a moscovite e a sericite em condições marinhas. A alteração da ortoclase também pode levar à formação destes minerais se nem todos os iões de potássio forem removidos (Whitlow, 1995).

A estrutura se trata de uma camada tetraédrica no meio de duas octaédricas, ou seja uma relação 2:1, sendo que entre as camadas octaédricas podem existir catiões de potássio (Vallejo et al., 2004). Esta estrutura encontra-se representada na Figura 2.8.

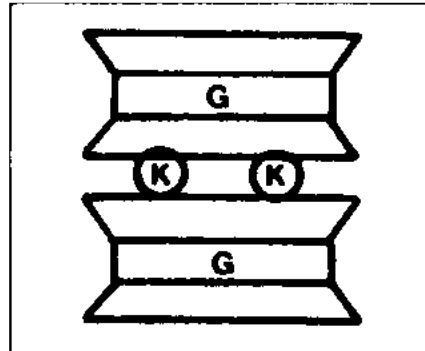


Figura 2.8 Estrutura do mineral ilite. A camada "G" representa a camada tetraédrica com Si^{4+} . (retirado de Whitlow, 1995).

Grupo da Esmectite

Tal como no caso anterior ocorrem como uma camada tetraédrica entre duas octaédricas, porém, neste caso, entre as camadas octaédricas poderão existir camadas de água com catiões, sendo estes maioritariamente de alumínio e magnésio. O mais comum mineral neste grupo é a montmorilonite, o qual resulta de uma alteração ainda mais profunda da ilite, ou da alteração das plagioclases (Whitlow, 1995). Na Figura 2.9 encontra-se uma representação da estrutura da montmorilonite.

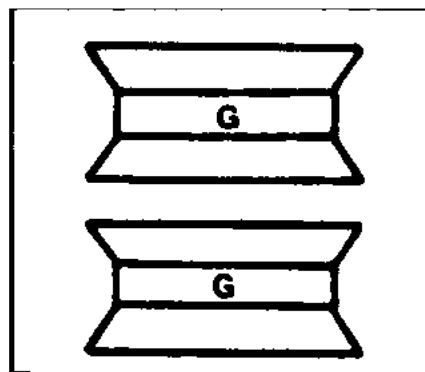


Figura 2.9 Estrutura do mineral montmorilonite. A camada "G" representa a camada tetraédrica com Si^{4+} . (retirado de Whitlow, 1995).

Grupo da Vermiculite

A vermiculite, e outros minerais deste grupo, resultam da alteração da biotite e da clorite e apresentam uma estrutura semelhante à da montmorilonite, porém, os catiões

entre as camadas são maioritariamente magnésio com algumas moléculas de água (Whitlow, 1995).

2.2.1.6 Resistência dos Solos

Como foi verificado no Subcapítulo 2.1.1.4, as rochas podem ser descritas tendo em conta a sua resistência à compressão simples. A mesma descrição pode ser feita nos solos. Na Tabela 2.17 encontra-se esta descrição, de acordo com a norma ISO.

Tabela 2.17 Descrição da resistência do solo e a correspondência com os valores de resistência à compressão simples (EN ISO 14689:2017).

Grau	Descrição	Identificação de Campo	Intervalo aproximado UCS [Mpa]
S1	Muito Brando	O punho penetra facilmente vários centímetros.	< 0,025
S2	Brando	O dedo penetra facilmente vários centímetros.	0,025 – 0,05
S3	Firme	Necessita-se de uma leve pressão para marcar com o dedo.	0,05 – 0,1
S4	Rijo	Necessita-se de uma forte pressão para marcar com o dedo.	0,1 – 0,25
S5	Muito Rijo	Com alguma pressão é possível marcar com o dedo.	0,25 – 0,5
S6	Duro	Marca-se com dificuldade com a unha.	> 0,5

2.2.2 Classificação de Solos

A classificação dos solos é realizada através de determinadas propriedades do mesmo como a granulometria e a plasticidade. Tal como no caso dos maciços rochosos a classificação do maciço terroso é de suma importância, seja para determinar quais os melhores métodos de reaproveitamento do material, no caso de escavações, ou para determinar se o material em questão é adequado para a fundação de um aterro ou não.

2.2.2.1 Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)

Mais tarde foi criado o Sistema Unificado de classificação de solos por Arthur Casagrande, que relaciona a granulometria com a plasticidade do solo. Foi inicialmente criado para aplicar em projetos de aeroportos, mas é hoje utilizado em todos os projetos nos quais seja necessário classificar os solos (Vallejo et al., 2004). Foi criado junto da Carta de Plasticidade de Casagrande, representada na **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

Ao aplicar esta classificação muitas vezes são acrescentadas informações sobre a composição química das amostras de forma a completar a mesma: matéria orgânica,

conteúdo de sulfatos e conteúdo de carbonatos, e em casos mais específicos, acrescenta-se ainda a restante composição química e a composição mineralógica da fração argilosa (Wagner, 1957). Na Tabela 7.3 (Anexo 7.2) encontra-se a classificação.

Juntamente com a criação dos diferentes grupos do Sistema Unificado, foi realizada uma associação entre os diferentes grupos e diversas propriedades consideradas importantes na engenharia, como: a permeabilidade quando compactado, a resistência ao corte e a compressibilidade quando compactado e saturado e a trabalhabilidade como material de construção (Wagner, 1957). Esta associação encontra-se na Tabela 2.18.

Tabela 2.18 Propriedades importantes dos solos (adaptado de Wagner, 1957).

Símbolo do Grupo	Propriedades Importantes			
	Permeabilidade quando compactado	Resistência ao corte quando compactado e saturado	Compressibilidade quando compactado e saturado	Trabalhabilidade como material de construção
GW	Permeável	Excelente	Desprezável	Excelente
GP	Muito Permeável	Boa	Desprezável	Boa
GM	Semipermeável a Impermeável	Boa	Desprezável	Boa
GC	Impermeável	Boa a Razoável	Muito Baixa	Boa
SW	Permeável	Excelente	Desprezável	Excelente
SP	Permeável	Boa	Muito Baixa	Razoável
SM	Semipermeável a Impermeável	Boa	Baixa	Razoável
SC	Impermeável	Boa a Razoável	Baixa	Boa
ML	Semipermeável a Impermeável	Razoável	Média	Razoável
CL	Impermeável	Razoável	Média	Boa a Razoável
OL	Semipermeável a Impermeável	Fraca	Média	Razoável
MH	Semipermeável a Impermeável	Razoável a Fraca	Alta	Fraca
CH	Impermeável	Fraca	Alta	Fraca
OH	Impermeável	Fraca	Alta	Fraca
Pt	-	-	-	-

2.2.2.2 Classificação para Fins Rodoviários (AASHTO)

A classificação da AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials* – trata-se de uma classificação de solos para fins rodoviários, descrita também na norma portuguesa LNEC.

Na norma descrita pela AASHTO a classificação do solo é feita através de sete grupos, utilizando resultados obtidos em testes laboratoriais como a Granulometria e os Limites de Atterberg. Os grupos A-1, A-2 e A-3 correspondem aos materiais granulares em que 35% ou menos apresentam granulometria menor que 75 µm (peneiro N°200),

enquanto os grupos 1-4, 1-5, A-6 e A-7 correspondem a materiais siltosos e argilosos, nos quais mais de 35% apresenta granulometria menor que 75 µm (peneiro Nº200) (AASHTO, 2021) Na Tabela 2.19 encontram-se os sete grupos e os resultados dos ensaios que correspondem a cada grupo.

Tabela 2.19 Classificação para Fins Rodoviários (AASHTO, 2021)

Classificação Geral	Materiais Granulares (35% ou menos com menos de 75 μm)							Materiais Silto-Argilosos (Mais de 35% com menos de 75 μm)			
Grupos	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5, A-7-6
Percentagem que passa na peneira com:											
2.00 mm (Nº 10)	50 max	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.425 mm (Nº 40)	30 max	50 max	51 min	—	—	—	—	—	—	—	—
75 μm (Nº 200)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
Características da fração que passa na peneira nº 40:											
Limite de Líquides	—		—	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
Índice de Plasticidade	6 max		Não Plástica	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min
Materiais que constituem o grupo	Fragmentos rochosos, gravilha e areia		Areia fina	Gravilha e areia siltosas a argilosas				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral	Excelente a Bom							Fraco a Pobre			

Com os resultados dos ensaios realizados ao solo, para além de classificar a amostra num dos grupos, é ainda possível calcular o “índice de grupo” de forma a avaliar do solo dentro dos próprios grupos. Este índice determina-se com uma fórmula, apresentada na Equação 2.15.

$$\text{Índice de Grupo} = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(IP - 10) \quad 2.15$$

Onde:

F – Percentagem que passa pela peneira Nº 200, expresso como um número inteiro. Esta percentagem baseia-se apenas no material que passa pela peneira com 75 µm.

LL – Limite de Liquidez

IP – Índice de Plasticidade

2.2.2.3 Classificação GTR (LCPC/SETRA)

A *Guide Technique: Réalisation des remblais et des couches de forme*, ou Classificação GTR trata-se de uma classificação de solos e materiais rochosos para a sua utilização em terraplanagens em obras rodoviárias. Baseia-se na caracterização dos solos através dos resultados de diversos ensaios laboratoriais, entre os quais a granulometria, os limites de Atterberg, o equivalente de areia, o azul de metileno e o *California Bearing Ratio* (CBR). Assim é possível determinar quais as condições em que este solo poderá ser utilizado e em que tipo de estruturas.

Presente no manual do LCPC/SETRA (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*)(*Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes*) existem diversas classificações e de modo a não criar equívocos aqui serão apresentadas apenas aquelas aplicadas no projeto da Linha de Alta Velocidade. Assim, no **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** é possível observar o gráfico para os solos com dimensão máxima menor ou igual a 50 mm, que se baseia em características intrínsecas do solo, estabelecendo relações entre a granulometria, neste caso trata-se da percentagem de material que passa no peneiro de 80 μ m (peneiro N°200), e o teor em argila do solo, representado pelo valor do índice de plasticidade (IP) e pelo valor de azul de metileno (VAM). Já no **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** o mesmo ocorre mas para materiais com dimensão máxima maior que 50 mm.

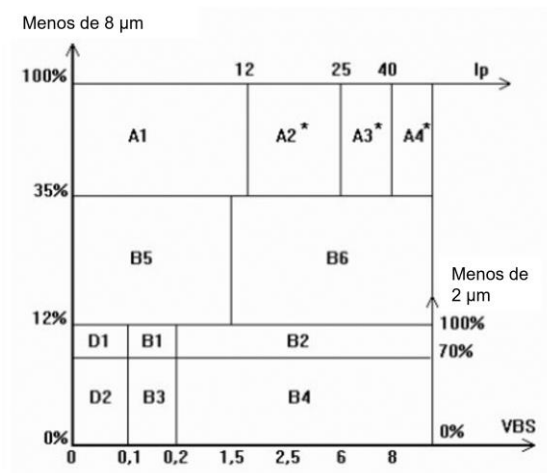


Figura 2.10 Gráfico com a Classificação de Solos LCPC/SETRA para solos com dimensão máxima ≤ 50 mm (adaptado de NFP 11 300, 1992).

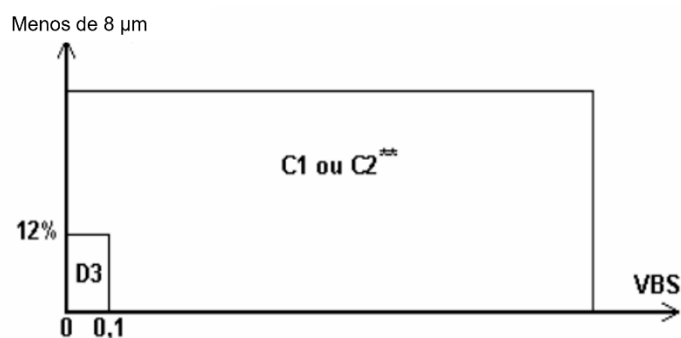


Figura 2.11 Gráfico com a Classificação de Solos LCPC/SETRA para solos com dimensão máxima >50 mm (adaptado de NFP 11 300, 1992).

Na Tabela 2.20 encontram-se as várias classes e os materiais a que correspondem.

Tabela 2.20 Materiais comuns em cada classe (adaptado de NFP 11 300, 1992).

Classe	Subclasse	Materiais
A	A1	Siltos com pouca plasticidade, loess, siltos aluvionares, areias finas com poucas impurezas, areias com pouca plasticidade
	A2	Areias argilosas finas, siltos, argilas e margas arenosas com pouca plasticidade
	A3	Argilas e argilas margosas, siltos com muita plasticidade
	A4	Argilas e argilas margosas com muita plasticidade
B	B1	Areias siltosas
	B2	Areias argilosas (pouca argila)
	B3	Grés siltosos
	B4	Grés argilosos (pouca argila)
	B5	Areias e grés muito siltosos
	B6	Areias e grés argilosos a muito argilosos
C	C1 Ai	Argilas com sílex, aluviões grosseiros (mais que 60% a 80% solos com granulometria <50 mm; esta fração tratam-se de solos de Classe A)
	C1 Bi	Argilas com sílex, argilas moídas, aluviões grosseiros (mais que 60% a 80% solos com granulometria <50 mm; esta fração tratam-se de solos de Classe B)
	C2 Ai	Argilas com sílex, argilas moídas (menos que 60% a 80% solos com granulometria <50 mm; esta fração tratam-se de solos de Classe A)
	C2 Bi	Argilas com sílex, argilas moídas (menos que 60% a 80% solos com granulometria <50 mm; esta fração tratam-se de solos de Classe B)
D	D1	Areias aluvionares sem impurezas, areias de duna
	D2	Grés aluvionares sem impurezas, areias
	D3	Grés aluvionares grosseiros sem impurezas, depósitos glaciares

3 Estudo Geológico-Geotécnico

Os estudos geológico-geotécnicos são de elevada importância na concessão de um projeto, quer para dimensionar o próprio projeto como para estimar preços do mesmo. Se o estudo geológico-geotécnico não for feito corretamente, ou não for feito de todo, pode causar graves riscos, durante ou após a construção, mas também pode fazer com que o projeto tenha estimado custos insuficientes para o que é realmente necessário (Vallejo et al., 2004).

Estes estudos são realizados durante todas as fases de um projeto, como mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Objetivos do estudo geológico-geotécnico nas diversas fases do projeto (adaptado de Vallejo et al., 2004).

Fases do Projeto	Objetivos geológico-geotécnicos
Estudo prévio e de viabilidade	Viabilidade geológica; Identificação de registos geológicos; Condições geológico-geotécnicas gerais
Anteprojeto	Seleção de locais e traçados; Classificação geotécnica de materiais; Soluções geotécnicas aproximadas
Projeto	Caracterização geotécnica detalhada; Parâmetros geotécnicos para o desenho de estruturas, escavações, cimentações, entre outros
Construção	Controlo geotécnico e instrumentação; Verificação e adaptação do projeto
Exploração	Controlo da resposta do terreno à estrutura; Auscultação

3.1 Estudo Prévio

Como visto acima o Estudo Prévio trata-se da primeira fase num projeto e consiste na primeira abordagem ao projeto. Nesta fase é realizada a compilação de informações sobre a área de interesse e todas as suas características. É durante esta etapa que se estudam as melhores abordagens à obra e as alternativas caso não seja viável. No caso da Linha de Alta Velocidade, foram realizadas diversas pesquisas e estudos de modo a determinar quais as melhores alternativas de traçado, seja no que toca às condições geológicas-geotécnicas, ou no que toca a questões de aproveitamento de terreno, perturbação à população, entre outros (Vallejo et al., 2004).

Embora seja realizada o estudo geológico-geotécnico nesta fase seja realizado em grande parte através da pesquisa e compilação de informação já existente, por vezes esta mostra-se insuficiente, levando à necessidade de realizar campanhas de prospeção complementares, que visam obter informação quanto às formações

geológicas existentes, nomeadamente as suas propriedades e o seu comportamento face às alterações que poderão vir a sofrer durante a obra (Vallejo et al., 2004).

3.2 Campanhas de Prospeção

Os métodos de prospeção tratam-se de um dos maiores apoios a uma obra durante todas as suas etapas, e podem ser classificados como:

- Diretos, ou seja envolvem observação direta do solo ou da rocha, levando à obtenção de amostras, exemplos deste tipo de método de prospeção são as sondagens mecânicas e os poços de reconhecimento;
- Semidiretos, que embora seja feita a observação direta do material, não é possível realizar a recolha de amostras, tendo sido criados os ensaios *in situ*, como SPT, penetrómetros ligeiros, entre outros, para contrabalançar esse facto;
- Indiretos, dado tratarem-se de ensaios e testes que realizam a medição de determinadas propriedades do maciço, como a resistividade elétrica ou a velocidade de propagação das ondas sísmicas, sem contactar diretamente com o maciço.

3.2.1 Investigação *In Situ*

Um dos mais importantes métodos de apoio ao Estudo Geológico Geotécnico é a realização de investigações *in situ*, de forma a melhor entender a entender as condições geológicas e geotécnicas no local em estudo, para além de caracterizar os materiais na que podem afetar a viabilidade, desenho e construção de uma obra. Estas campanhas de investigação devem ser planeadas e organizadas, fazendo uso de informação geológica e geotécnica, quer de cartas geológicas e projetos ou estudos já realizados na zona de interesse (Vallejo et al., 2004).

Antes de planear uma campanha de investigação *in situ*, como referido anteriormente, deve ser feita uma compilação da informação já existente sobre a zona de interesse, na qual se devem incluir não só cartas geológicas e geotécnicas e prospeção já realizada na área para outros projetos, mas também fotografias aéreas de forma a melhor entender a quantidade, o tipo e a estruturação da campanha de prospeção. Dependendo do local e da informação que já exista, a campanha deve ser organizada da melhor e mais eficaz maneira, de modo que haja um estudo minucioso

das características geológicas e geotécnicas, sem levar a um excessivo uso dos recursos existentes (Vallejo et al., 2004)

Existem variados métodos para a investigação *in situ*, sendo importante começar pelo reconhecimento geológico de campo, que apoiado pela pesquisa bibliográfica pode apoiar na estruturação da restante campanha de investigação.

A descrição dos métodos de prospeção nos subcapítulos abaixo foi realizada com base na norma ISO 22475-1:2021.

3.2.1.1 Reconhecimento Geológico de Campo

As saídas de campo são de suma importância também para a organização da restante prospeção, quer em obras à superfície ou em subterrâneo. A organização deste trabalho de reconhecimento deve ser feita cuidadosamente, sendo necessário verificar previamente quais os locais de maior interesse e nos quais seja possível adquirir informação (Vallejo et al., 2004).

Nestas saídas de campo é feita uma observação detalhada do estado do maciço, rochoso ou terroso, verificando a alteração e fraturação, no caso do primeiro, e, a cor e a granulometria, no caso do segundo. Também deve ser estudada a resistência de ambos, com auxílio às próprias mãos, ou a um martelo de geólogo. Estes são dados importantes que constituem um primeiro entendimento quanto às propriedades do maciço, possibilitando classificar o mesmo desde logo (Vallejo et al., 2004).

Na realização de reconhecimento de campo, são utilizadas fichas de apoio que permitam caracterizar e posteriormente classificar o maciço, como a mostrada na Figura 3.1. Nestas fichas, para além das características e propriedades do maciço, são também descritas as discontinuidades nele existentes, bem como informações quanto à localização do afloramento.

[illegible]

Figura 3.1 Exemplo de uma Ficha de Reconhecimento de Campo.

3.2.1.2 Sondagens Geotécnicas

As sondagens geotécnicas tratam-se de método de prospeção direto, envolvendo a furação do terreno e a recolha de amostras para a realização de ensaios laboratoriais. É também um dos métodos de prospeção *in situ* mais utilizados para a caracterização do maciço rochoso em profundidade (Vallejo et al., 2004).

Existem vários tipos de sondagem geotécnica, porém para este relatório serão apenas mencionadas as sondagens com furação à rotação. São mais comum tipo de sondagem dado que possibilitam uma furação a profundidades que chegam a 1 000 metros, embora geralmente não excedam os 100. Permitem ainda a perfuração

inclinada, importante especialmente se a sondagem tiver como objetivo intercetar estruturas lineares como falhas, zonas de cisalhamento e contactos geológicos, e a recuperação do material intersetado pela própria sondagem (Vallejo et al., 2004). Na Figura 3.2 encontra-se um exemplo do testemunho retirado de uma sondagem do projeto relatado no Capítulo 4.



Figura 3.2 Exemplo do testemunho de uma sondagem (Campanha de Prospeção de 2023 realizada pela IP para o concurso do Lote A da Fase 1 da Linha de Alta Velocidade Porto-Lisboa).

Após a realização da sondagem é feita uma descrição rigorosa dos materiais recolhidos, na qual são expostas, para além da litologia, as características do maciço rochoso, como o seu estado de alteração e fraturação, e ainda o calco do valor da recuperação e do RQD. Com estas informações é então realizado o boletim da sondagem, na qual se encontram, para além das informações geológicas e dos testes realizados, as informações técnicas, como as coordenadas da sondagem, a sua profundidade, o equipamento utilizado para a furação, entre outros. Na Figura 3.3 encontra-se um exemplo de um boletim de sondagem, correspondente à sondagem na Figura 3.2.

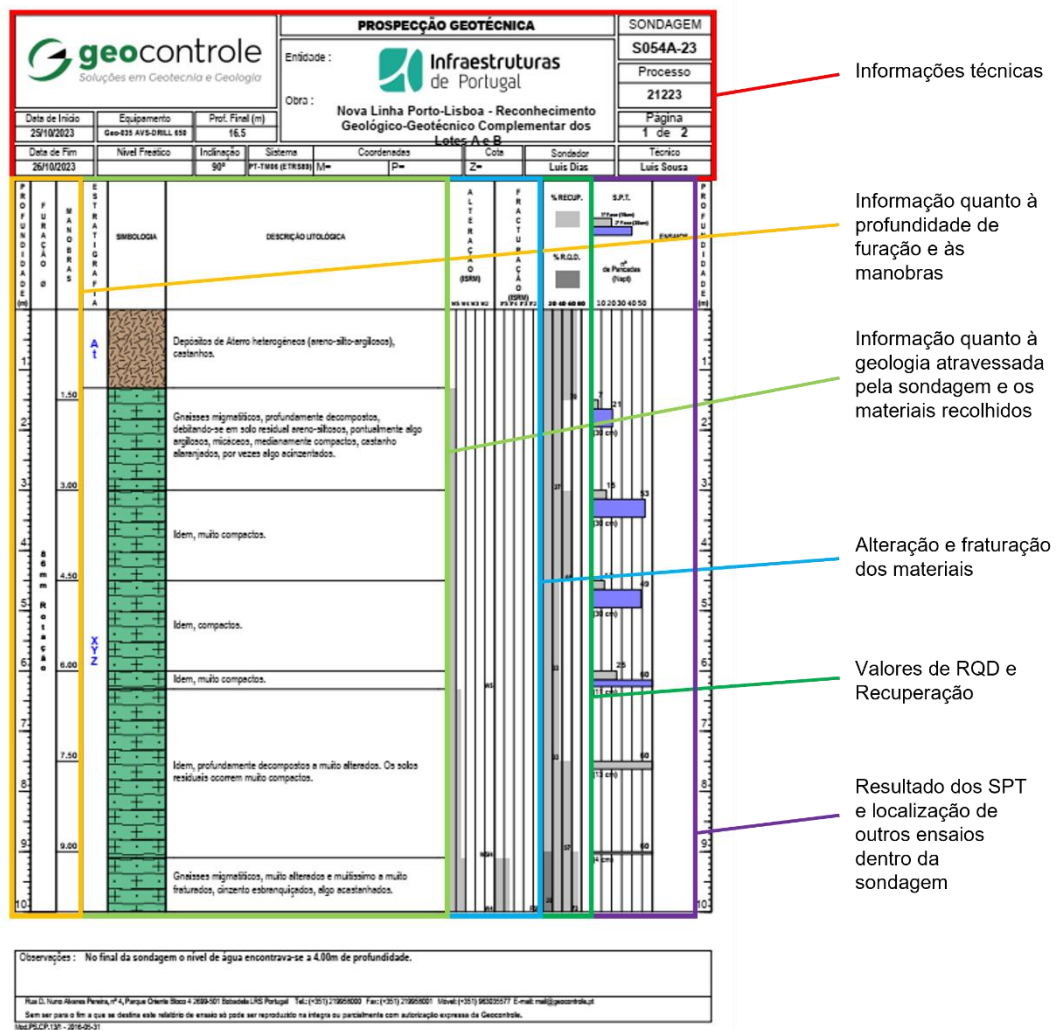


Figura 3.3 Exemplo do boletim de uma sondagem (Campanha de Prospeção de 2023 realizada pela IP para o concurso do Lote A da Fase 1 da Linha de Alta Velocidade Porto-Lisboa).

3.2.1.3 Poços e Valas de Reconhecimento

Por sua vez os poços de prospeção são escavações menos profundas e mais largas que permitem uma melhor observação do material *in situ* e a realização de ensaios no mesmo. Deste modo, embora permita uma melhor descrição das suas características à superfície, tal como o reconhecimento de campo, encontra-se limitado em termos de profundidade (Vallejo et al., 2004). Na Figura 3.4 encontra-se um exemplo da escavação de um poço, onde é possível observar, como referido, os horizontes do solo, a sua consistência, entre outras características.



Figura 3.4 Exemplo de um poço de prospeção (Campanha de Prospeção de 2005 realizada pela IP para a Linha de Alta Velocidade Porto-Lisboa).

Os poços e sondagens possibilitam ainda a realização de diversos ensaios *in situ* como SPT, e a recolha de amostras para realização de ensaios laboratoriais. Há diversos tipos de amostras possíveis de ser recolhidas tais como:

- **Amostras Inalteradas**, as quais como o nome indica não sofrem nenhuma alteração, quer na sua estrutura ou no conteúdo de humidade. São amostras particularmente importantes em ensaios de resistência, deformabilidade e permeabilidade (Vallejo et al., 2004).
- **Testemunho Parafinado** trata-se de um testemunho resultante da realização da sondagem, revestidos por uma camada de parafina de modo as suas características não se alterem. Este tipo de amostras pode ser utilizado em qualquer ensaio laboratorial (Vallejo et al., 2004).
- **Amostras alteradas**, embora apresentem uma alteração na estrutura e no conteúdo de humidade, mantém a sua composição mineralógica. São retiradas de poços e outras escavações, permitindo a realização de ensaios laboratoriais de identificação (Vallejo et al., 2004).

- **Amostras de Água** são adquiridas nos aquíferos detetados durante a furação da sondagem, sendo importantes para realizar análises químicas à água (Vallejo et al., 2004).

3.2.1.4 Prospeção Geofísica

A investigação *in situ* com recurso a observação *in situ* e prospeção mecânica, embora de elevada importância também tem as suas limitações, no caso da observação de afloramentos *in situ* a informação conseguida só traduz o que acontece à superfície, não tendo possibilidade de observar as condições em profundidade. Por outro lado a prospeção mecânica como a realização de sondagens, embora dê informação em profundidade, esta informação limita-se a uma zona relativamente pequena, não podendo identificar grandes estruturas, como falhas. Assim, em complemento à prospeção mecânica e à observação de afloramentos *in situ*, deve ser feita também prospeção com métodos geofísicos, utilizando ondas sísmicas, resistividade elétrica, entre outras (Vallejo et al., 2004). Os métodos geofísicos podem ser aplicados quer em superfície ou dentro das próprias sondagens, no caso do projeto referido no Capítulo 4, foram utilizados ambos, particularmente os métodos sísmicos em superfície e *cross-hole*, e por isso será feita uma abordagem mais pormenorizada a estes.

3.2.1.4.1 Métodos Sísmicos de Superfície

O objetivo destes métodos de prospeção é estudar a propagação das ondas sísmicas no terreno e dado que esta depende de constantes elásticas e da elasticidade do meio, permite a identificação de contactos geológicos e superfícies de alteração, dado que uma rocha sã apresenta maior velocidade que um solo ou uma rocha alterada. Isto implica também que num modelo normal ocorra um aumento da velocidade das ondas sísmicas com o aumento da profundidade. Podem ser aplicados métodos sísmicos de refração, que utilizam a refração das ondas sísmicas nas superfícies entre camadas com comportamentos diferentes, ou por métodos de reflexão, que utilizam a reflexão das ondas sísmicas nas diferentes superfícies (Vallejo et al., 2004). No Tabela 3.2 estão as velocidades de propagação de ondas P em vários tipos de rochas e materiais.

Tabela 3.2 Intervalos da velocidade com que as ondas P se propagam em determinados materiais.

Material	Ondas P (m/s)
Areia seca	200 - 1000
Zona superficial alterada	300 - 700
Areia saturada com água	800 - 2200
Argila	1000 - 2500
Arenito	1400 - 4300
Água	1450 - 1500
Xisto	3000 - 4000
Calcário	5900 - 6100
Gelo	3400 - 3800
Granito	5500 - 5900
Basalto	6400

Sísmica de Refração

É o método sísmico mais comumente utilizado e trata-se da realização de perfis longitudinais com auxílio a geofones, sensores específicos, afastados entre si por uma distância previamente regulada, não maior do que 5 metros, em perfis com um comprimento de 25 a 100 metros. É então utilizada uma marreta de cerca de 8,00 kg para golpear o solo, simulando ondas sísmicas no solo, em pelo menos três locais do perfil, nas duas pontas e a meio. Os geofones medem então o tempo que decorre entre o tiro e o momento em que o próprio geofone deteta a onda, de forma a calcular a velocidade com que se propagam as ondas no meio subterrâneo e também a profundidade em que as diferentes camadas com diferentes velocidades de propagação se encontram (Vallejo et al., 2004).

3.2.1.4.2 Métodos Sísmicos “Cross-hole”

Tal como foi o caso dos métodos sísmicos à superfície o objetivo permanece em medir o tempo que as ondas sísmicas demoram a percorrer um determinado espaço nos materiais subterrâneos, permitindo assim o cálculo da velocidade das ondas nestes materiais. Porém no caso da sísmica em *cross-hole* os tempos não são medidos num perfil mas sim entre duas ou três sondagens próximas. A realização deste ensaio consiste em colocar uma sonda triaxial dentro de um ou dois furos de sondagem a várias profundidades e no outro realizar as pancadas, variando a profundidade de modo a obter um resultado mais preciso, medindo assim os tempos que as ondas levam a atravessar o terreno entre sondagens (Vallejo et al., 2004).

3.2.1.5 Ensaios *In Situ*

Como mencionado anteriormente, um dos benefícios da realização de sondagens, poços e valas, é que auxiliam à realização de ensaios e testes *in situ*, os quais podem ser realizados em solo ou em rocha, sendo especialmente importantes os SPT, os ensaios de penetração dinâmica (como PDL e DPSH), os CPT, entre outros, embora alguns destes possam ser realizados separadamente das sondagens ou dos poços, como é o caso dos ensaios de penetração dinâmica (Vallejo et al., 2004).

Os ensaios de penetração dinâmica são dos mais comuns ensaios *in situ* e serão abordados neste capítulo, nomeadamente os DPSH, *Dynamic Probe Super Heavy*, e os PDL, Penetrómetros Dinâmicos Ligeiros. O seu objetivo é determinar a resistência dos solos à penetração dependendo da profundidade. Dentro dos vários ensaios de penetração dinâmica à uma diferença nas cargas aplicadas, podendo ser mais ou menos pesado e afetar o terreno de formas diferentes. Assim os diferentes tipos de ensaio são utilizados em diferentes tipos de terreno e material.

3.2.1.5.1 “Standard Penetration Test” (SPT)

Este é um ensaio realizado particularmente em solos, sendo o seu objetivo estimar um valor de resistência à penetração que possa ser correlacionado com outros aspetos do solo como a densidade relativa, o tipo de solo, entre outros.

O ensaio consiste em deixar cair um martelo com 63,5 kg de uma altura de 760 mm dentro da sondagem, sendo a resistência à penetração o número de pancadas necessário para atingir 300 mm de penetração no solo, sendo que quanto menos pancadas forem necessárias, menos resistente será o solo (ISO 22476-3:2005).

Este teste realiza-se em 3 fases, cada uma corresponde a 30 cm de penetração, sendo as últimas duas somadas para obter o número de pancadas (N). Já a primeira fase, correspondente aos primeiros 15 cm, não é contada para o número de pancadas. Se forem necessárias 60 pancadas para penetrar os 30 cm o teste dar-se-á por terminado. No caso de serem necessárias as 60 pancadas logo na primeira fase, não é feita uma segunda ou uma terceira fase, dando-se por terminado o teste na sondagem. A esta situação é dado o nome de “Nega” (ISO 22476-3:2005).

Nas Tabela 3.3 e Tabela 3.4 encontra-se a classificação geotécnica geralmente dada aos materiais de acordo com os valores de N_{SPT} que apresentarem.

Tabela 3.3 Classificação das areias quanto à compactidade (ISO 22476-3:2005).

NSPT	Compactidade
0 – 4	Muito solta
4 – 10	Solta
10 – 30	Média
30 – 50	Compacta
> 50	Muito compacta

Tabela 3.4 Classificação de argilas quanto à consistência (ISO 22476-3:2005).

NSPT	Consistência	Resistência à Compressão Simples (kN/m ²)
< 2	Muito mole	< 25
2 - 4	Mole	25 – 50
4 - 8	Média	50 – 100
8 - 15	Dura	100 - 200
15 - 30	Muito dura	200 - 400
> 30	Rija	> 400

3.2.1.5.2 Penetrómetros Dinâmicos

Como referido acima, os diferentes penetrómetros dinâmicos apresentam diferentes nomes dado que apresentam diferentes massas e tamanho do cone. Assim, diferentes ensaios são aplicados em diferentes materiais. Nestes ensaios uma carga com determinada massa é largada de uma determinada altura, múltiplas vezes, a uma taxa de 15 a 30 pancadas por minuto, excetuando quando os materiais são arenosos, nos quais a taxa pode ser aumentada para 60 pancadas por minuto.

No caso do Penetrómetro Dinâmico Ligeiro (PDL) como o próprio nome indica, trata-se de um ensaio com uma carga mais leve, sendo esta de 10,0 kg e deve ser largada de uma altura de 0,50 m. No caso deste teste devem contar-se o número de golpes a cada 10 cm, sendo este valor o N_{10} , que varia entre 3 e 50 pancadas.

Já para o Penetrómetro Dinâmico Superpesado (DPSH), este pode ser dividido em DPSH-A e DPSH-B, ambos os quais com um peso de cerca de 63,5 kg, porém o primeiro largado de uma altura de 0,5 m e o segundo de uma altura de 0,75 m. Em ambos os casos é registado o número de pancadas necessárias para que o cone penetre 20 cm no solo. Este número de pancadas é representado por N_{20} , variando entre 5 e 100 pancadas (ISO 22476-2:2002).

Em qualquer um dos casos, após a realização do ensaio é feito o cálculo da resistência unitária de ponta, o r_d , o qual se trata de uma avaliação do trabalho realizado na penetração do solo, e da resistência dinâmica de ponta, q_d , que tem em consideração a inércia após o impacto da carga com a base (ISO 22476-2:2002).

3.2.2 Ensaaios Laboratoriais e *Ex situ*

Os ensaios *in situ* têm diversas vantagens, dado serem realizados mais rápido, produzirem resultados quase imediatos e não necessitarem de muitas preparações quanto às amostras. Estas amostras serão submetidas a ensaios laboratoriais, podendo estes tratar-se de ensaios de identificação, de modo a identificar o material da amostra, e ensaios de caracterização de modo a caracterizar os materiais quanto às suas propriedades físicas e mecânicas. Nos ensaios realizados pela IP, quer nos estudos de 2007/2008, quer agora durante a campanha de prospeção realizada durante o fim de 2023 e o início de 2024, incluíram-se os seguintes: análises granulométricas por peneiração, determinação dos limites de Atterberg, ensaio de equivalente de areia e azul de metileno, determinação do teor em água natural, compactação pesada, ensaios CBR e ainda Ensaaios de Compressão Uniaxial.

3.2.2.1 Ensaaios de Identificação de Solos

Os ensaios de identificação permitem a determinação das propriedades necessárias para a classificação do próprio solo.

3.2.2.1.1 Análise Granulométrica por Peneiração

A análise granulométrica de um solo indica qual o tamanho das partículas que o compõem permitindo a sua classificação como sendo um solo arenoso, siltoso ou argiloso, ou ainda uma junção de todos eles com diferentes percentagens de cada. Pode ser realizada através de 2 diferentes métodos: peneiração, para materiais mais grosseiros e sedimentação para materiais mais finos (ISO 17892-4:2016). No caso dos ensaios feitos para a Linha de Alta Velocidade, apenas o primeiro método, da peneiração foi utilizado.

A peneiração é realizada utilizando uma série de peneiros com redes de diferentes tamanhos, sendo as mais comuns a peneira Nº10, correspondente a 2 mm, Nº40, 0,42 mm, e Nº200, 0,074 mm. Devem ser usadas tantas peneiras quantas se determinem

necessárias para realizar a curva granulométrica. Este ensaio pode ser realizado utilizando uma amostra húmida ou seca, porém, ao realizar as pesagens para determinar a massa de material que terá ficado retida na peneira, o material deverá estar seco (ISO 17892-4:2016).

Antes de iniciar o ensaio, as peneiras são empilhadas umas em cima das outras, da com maior abertura para a menor, e é colocada a amostra pesada dentro da primeira. A “torre” de peneiras é então abanada, quer manualmente quer com recurso a um agitador mecânico, durante o tempo necessário para que todo o material se encontre distribuído pelas peneiras. As partículas retidas em cada peneira são então pesadas e é calculada a percentagem de material que passou em cada peneira utilizada, podendo depois criar uma curva granulométrica (ISO 17892-4:2016).

3.2.2.1.2 Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg foram já referidos no Subcapítulo 2.2.1.2 dado que caracterizam o comportamento de um solo como sendo sólido, semissólido, plástico ou semilíquido. O realizado em laboratório visa determinar dois dos limites definidos por Atterberg: o Limite de Liquidez (LL) e o Limite de Plasticidade (LP), de forma a obter também o Índice de Plasticidade (IP). O LL representa o limite de quantidade de água em que um solo deixa de apresentar um comportamento líquido para apresentar um comportamento plástico, e o LP o ponto em que ao sofrer uma secagem ainda maior o solo deixa de apresentar um comportamento plástico. O limite de liquidez é possível de ser determinado com os métodos descritos na norma ISO 17892-12:2018: o Ensaio de penetração com cone (*Fall Cone Test*) e o método de Casagrande. No caso dos ensaios realizados para a Linha de Alta Velocidade, estes foram realizados utilizando o método de Casagrande como descrito na NP 143:1969.

Fall Cone Test

Este teste começa ao colocar a amostra de solo na base do equipamento, com um cone de aço inoxidável com as dimensões referidas na Tabela 3.5 posicionado diretamente acima.

Tabela 3.5 Características do cone utilizado no ensaio (ISO 17892-12:2018).

Propriedades	Unidade	Valores	
Massa do cone e da haste	g	60±0,06	80±0,08
Ângulo da ponta	°	60±0,2	30±0,2
Altura do cone	mm	³20	³30
Desvio da ponta geométrica durante o fabrico	mm	<0,1	<0,1

O mesmo é libertado de modo a cair em cima da amostra, deixando-se ficar durante cerca de 5 segundos de modo a penetrar a amostra. A penetração é então calculada como sendo a diferença entre as posições inicial e final do cone. Deve verificar-se se a penetração se encontra no intervalo definido como admissível para que o ensaio tenha sido realizado corretamente, dependendo do cone utilizado. Este intervalo encontra-se entre 7 e 15 mm, para um cone de 60g/60°, ou 15 a 20 mm, para um cone de 80g/30°.

Após a realização do teste são retirados 15 gramas da amostra, de forma a calcular o teor em água. O restante da amostra é colocado novamente na base, aumentando-se ligeiramente o teor em água, e repete-se o teste quatro ou mais vezes de forma a ter valores de penetração para vários teores de água. É então realizado um gráfico linear com o teor em água, em percentagem, e a penetração, em mm. O LL trata-se, assim, do teor em água correspondente a uma penetração de 10 mm, no caso de um cone de 60g/60°, ou 20 mm, no caso de um cone de 80g/30°.

Método de Casagrande

Este método é realizado colocando uma amostra de solo num “copo de Casagrande”, um recipiente semiesférico que é elevado e depois largado uma determinada distância até uma base. A amostra é colocada de forma a ter no mínimo 10 mm de altura no seu ponto mais profundo. É então feita uma pequena vala no centro da amostra de forma a poder observar-se a face do recipiente. O recipiente é então elevado e largado o número de vezes que forem necessárias para que a vala se feche. O valor de rotações deve ser entre 15 e 40 para que o ensaio seja válido (NP 143:1969).

Tal como no método anterior, são retiradas 15 gramas da amostra de forma a calcular o teor em água e o ensaio é repetido com a amostra que restar, ajustando o teor em água a cada novo ensaio. É realizado um gráfico linear com o teor em água, em percentagem, e o número de rotações. O LL neste caso trata-se do teor de água correspondente a 25 rotações.

Limite de Plasticidade

O ensaio para o cálculo do Limite de Plasticidade consiste em moldar uma amostra de solo em forma de esfera nas mãos até que o calor produzido crie pequenas fissuras na esfera. Nesse momento a esfera deve ser dividida em duas porções de igual massa. Uma dessas porções será dividida ainda em três sub-porções que serão moldadas, uma de cada vez, em filamentos com 6 mm de espessura. Cada um será depois moldado até apresentar um diâmetro de 3 mm, verificando o ponto em que o filamento se desfaça após ter esse diâmetro. O ensaio é repetido com a outra porção. Após cada filamento se desfazer deve ser colocado num recipiente tapado, os três filamentos de cada porção juntos num recipiente, e deve ser calculado o teor em água de cada porção (ISO 17892-12:2018).

Se os resultados do teor de água para o limite de plasticidade diferirem mais de 2% em termos absolutos para valores de LP menores ou iguais a 40%, ou mais de 5% em termos relativos para valores de LP superiores a 40%, o ensaio deverá ser repetido. O PL trata-se da média do teor de água das duas determinações do limite de plasticidade (ISO 17892-12:2018).

3.2.2.1.3 Valor de Azul de Metileno

Tal como é o caso do anterior ensaio, o objetivo deste ensaio passa pela determinação da quantidade de elementos argilosos no solo, o qual é importante para determinar como pode ser reaproveitado o material de escavação, bem como que estruturas de suporte poderão vir a ser necessárias.

Este ensaio consiste na introdução de corante azul de metileno num goblé com água destilada e a amostra de solo. São adicionados 5 ml de corante, procedendo à agitação da solução durante 1 minuto, após o qual se deve realizar o Teste da Mancha. Este consiste em retirar uma gota da preparação e colocá-la num papel de filtro, formando-se uma mancha composta por um depósito central de material a azul escuro, e uma auréola húmida incolor. Este processo vai-se repetindo desta forma até que, no teste da mancha, a auréola exterior seja de um tom azul claro, após esse momento deve continuar-se a agitação, realizando-se o teste da mancha em intervalos de 1 minuto. Se a auréola desaparecer nos primeiros 4 minutos, dever-se-á adicionar mais 5 ml à solução, se desaparecer ao fim de 5 minutos, a adição será de apenas 2 ml. Apenas quando a auréola se mantiver após 5 minutos se poderá dar o ensaio como terminado,

registrando-se o volume total de corante que se colocou na solução (NP EN 933-9:2009+A1:2017).

O Valor de Azul de Metileno (VAM) refere-se à quantidade de corante azul de metileno adsorvido por 100 gramas do material testado. O cálculo encontra-se expresso na Equação 3.1.

$$VAM = \frac{V_1}{M_1} \times 10 \quad 3.1$$

Em que:

V_1 – Volume total de corante adicionado, em mililitros

M_1 – massa do provete de ensaio, em gramas

3.2.2.1.4 Equivalente de Areia

O equivalente de areia (EA) é a característica de um solo que expressa a quantidade e a qualidade dos elementos finos plásticos nele presentes.

O ensaio é realizado utilizando uma amostra de solo com 500 g, passada no peneiro nº 4 (4,76 mm), de forma a não perder os finos presentes na amostra. Esta é colocada junto com uma solução de cloreto de cálcio cristalizado anidro, glicerina a 99% de glicerol, formaldeído, diluído com água destilada até perfazer $5 \pm 0,05 \text{ dm}^3$. Primeiramente é colocada a solução diluída numa proveta até à altura de referência de $100 \pm 0,25 \text{ mm}$, colocando-se depois a amostra de solo, deixando repousar durante 10 minutos. Após os 10 minutos a proveta é celada e posicionada num agitador, numa agitação de 90 ciclos em 30 segundos. No final a proveta é retirada e colocada na mesa, onde com auxílio do tubo de lavagem se lavam as paredes da proveta, após isso o tubo deve ser introduzido até ao fundo da proveta várias vezes, obrigando os elementos argilosos a subir. Este movimento deve ser mantido até que o líquido atinja o limite de referência superior à altura de $380 \pm 0,25 \text{ mm}$, o tubo é então retirado lentamente. O material é então deixado em repouso durante 20 minutos, após os quais é medida a altura do material floculado, h_1 , e a altura do material sedimentado, h'_2 . É então posicionado o pistão na proveta, repousando no material sedimentado, nesse momento mede-se a altura h_3 entre a parte superior da peça guia apoiada no topo da proveta e a face inferior do pistão junto ao material sedimentado. A altura do sedimento h_2 calcula-se subtraindo h_3 à constante do aparelho k – distância entre a face superior da peça

guia e a face inferior do pistão, quando esta se encontra junto à base da proveta (LNEC E 199-1967). Assim, o Equivalente de Areia é dado pela Equação 3.2.

$$EA = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad 3.2$$

Em que:

h_1 – altura do nível superior do floculado em relação ao fundo da proveta.

h_2 – altura do sedimento determinada com auxílio do pistão.

3.2.2.2 Ensaios de Caracterização de Solos

Enquanto os ensaios de identificação visam determinar o tipo de solo da amostra, os ensaios de caracterização procuram determinar as suas propriedades mecânicas, como a compactação do solo e o teor em água do solo.

3.2.2.2.1 Proctor Modificado

O ensaio Proctor Modificado visa relacionar o teor de água numa amostra de solo com o peso específico seco do mesmo, numa curva de compactação. Este teste permite determinar se o solo apresenta as características de compactação e teor de água ideais para a sua utilização na fundação de aterros e pilares de pontes e viadutos, entre outras estruturas.

O ensaio é realizado colocando a amostra de solo com um determinado teor em água num molde em 5 camadas, sendo que cada camada deve ser compactada entre 25 e 56 vezes com um compactador de 4,53 kg, largado de uma altura de 45,72 cm. Este ensaio deve ser repetido várias vezes com diferentes teores de água em cada amostra, devendo estas ser pesadas antes e depois de realizar o ensaio (ASTM D1557-07).

Para calcular o peso específico seco, deve ser feito o cálculo do peso específico saturado primeiro, com a massa da amostra no molde e a massa e o volume do mesmo. O cálculo do peso específico seco é feito com a Equação 3.3, sendo necessário converter posteriormente as unidades de g/cm³ ou kg/m³ para kN/m³.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + \frac{w}{100}} \quad 3.3$$

Em que

γ_d – Peso específico seco, g/cm³ ou kg/m³

γ_m – Peso específico saturado da amostra, g/cm³ ou kg/m³

w – Teor de água da amostra, %

Após este cálculo é realizada a curva de compactação, onde se relaciona o peso específico seco com o teor de água da amostra. Neste gráfico é possível verificar qual o peso específico seco máximo e qual o teor de água de saturação.

3.2.2.2.2 California Bearing Ratio (CBR)

Este ensaio é realizado com o objetivo de determinar a resistência dos solos que possam vir a compor os materiais de fundação de diversas estruturas.

No ensaio de laboratório, um pistão circular é utilizado para penetrar o material compactado num molde a uma taxa constante de penetração. O CBR é determinado como a razão entre a carga unitária no pistão necessária para penetrar 2,5 mm e 5,0 mm na amostra e a carga unitária necessária para penetrar uma amostra padrão de rocha britada bem graduada (LNEC E 198-1967).

O ensaio de CBR encontra-se intrinsecamente ligado com o ensaio de Proctor Modificado, dado que as amostras antes de serem submetidas ao ensaio CBR, devem ser compactadas através do ensaio de Proctor Modificado. São compactadas 3 amostras, com 12, 25 e 55 pancadas o que vai causar uma diferença nos valores do peso específico seco, e, por sua vez, no próprio índice CBR (LNEC E 198-1967).

Após a realização do ensaio, é traçada uma curva força-penetração, na qual, no troço inicial é comum ocorrer uma concavidade, que deve ser corrigida traçando uma tangente à curva no ponto de inflexão. A força necessária para a penetração em 2,5 mm e 5,0 mm é então corrigida e é calculado o índice de CBR para cada um dos provetes para ambas as penetrações, em percentagem pela Equação 3.4.

$$CBR (\%) = \frac{x}{y} \times 100 \quad 3.4$$

Em que:

x – força, expressa em quilogramas-força, kgf, correspondente a uma determinada penetração do provete no solo

y – força, expressa em quilogramas-força, kgf, correspondente à mesma penetração num provete padrão. Este valor corresponde a 1355 kgf para a penetração de 2,5 mm, e 2033 kgf para 5,0 mm

Para além destes valores, um outro valor relevante é o CBR para 95% da compactação relativa e um teor ótimo de água, obtido durante a compactação. Este valor não deve ser confundido com o valor de 95% da Compactação Relativa, dado que este não apresenta o teor ótimo de água.

3.2.2.2.3 Teor em Água Natural

Como verificado nos ensaios anteriores, a determinação do teor em água natural de uma amostra é de elevada importância para a realização de outros testes.

O teste é realizado colocando a amostra num recipiente seco de massa conhecida (m_c), determinando-se a massa total (massa m_1). O recipiente com a amostra deve ser depois colocado na estufa com uma temperatura constante de 105°C a 110°C, durante cerca de 16 horas, momento em que apresentará uma massa constante. Após essa secagem deve medir-se a massa do conjunto novamente (massa m_2) (ISO 17892-1:2014). O cálculo do teor em água natural é, assim, representado pela Equação 3.5.

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_c} \times 100 = \frac{m_w}{m_d} \quad 3.5$$

Em que:

w – teor de água, em %

m_1 – massa inicial do recipiente com a amostra, em g

m_2 – massa final do recipiente com a amostra, em g

m_c – massa do recipiente, em g

m_w – massa de água, em g

m_d – massa da amostra seca, em g

3.2.2.3 Ensaio de Compressão Uniaxial

O ensaio de Compressão Uniaxial pode ser realizado em rocha ou em solos, sendo que no caso do projeto da Linha de Alta Velocidade foi realizado apenas em rocha. Neste teste é determinada a resistência à compressão uniaxial de um provete, também denominada por tensão, bem como o módulo de elasticidade. Estas características são das mais importantes na classificação dos maciços (ISRM, 1978).

As amostras consistem em cilindros rochosos, provenientes das sondagens, com um rácio altura/diâmetro entre 2,5 e 3,0, e com diâmetro não maior que 54 mm. A mostra deve apresentar as extremidades lisas e perpendiculares ao eixo da amostra, e os lados devem ser também lisos e sem irregularidades. A esta amostra deve ser aplicada uma carga a uma taxa de tensão constante, gerando uma falha no período de 5 a 10 minutos após o começo do ensaio. Esta taxa de tensão deve manter-se entre 0,5 e 1,0 MPa/s.

O cálculo da resistência à compressão, também referido como tensão de rotura (q_u), é realizado através da Equação 3.6, na qual é relacionada a secção do provete com a carga máxima aplicada ao mesmo.

$$q_u = \frac{\text{carga máxima aplicada ao provete}}{\text{secção original do provete}} \quad 3.6$$

4 Projeto: Linha de Alta Velocidade Porto- Lisboa Fase 1 – Lote A

A Linha de Alta Velocidade Porto-Lisboa é o principal tema deste relatório e o projeto de estágio, e, assim, todo o relatório foi organizado de forma a melhor entender o projeto e aquilo que foi feito durante o estágio.

4.1 Soluções de Traçado, Variantes e Ligações

Como foi referido no Subcapítulo 1.4, para este projeto foram pensadas várias soluções de traçado, ligações entre elas, variantes e também a ligação à Linha do Norte que varia tendo em conta qual a solução a ser escolhida. Foram submetidas à Avaliação de Impacte Ambiental (AIA): 3 soluções – Solução A, Solução B e Solução C –, 4 interligações entre a Solução A e a Solução B – ILBA São João Loure, ILBA Canelas, ILAB Loureiro e ILBA Ovar –, 2 variantes à Solução A – Variante de Monte Mourão e Variante de Vila Nova de Gaia – e a Ligação à Linha do Norte, que tem ligeiras diferenças dependendo se o traçado for feito com a Solução A, com a Solução B ou com a ILBA Canelas. De forma a melhor organização o trajeto foi dividido em 4 trechos: o Trecho 1, que corresponde desde o início do traçado até depois da Ligação de Canelas à Linha do Norte; o Trecho 2, desde o final do Trecho 1 até ao final da Variante de Monte Mourão; o Trecho 3, do final do Trecho 2 até à Estação de Santo Ovídio; e, por fim, o Trecho 4 que corresponde à Solução C.

A Solução A e a Solução B tratam-se de soluções de traçado propostas já nos primeiros estudos da Linha de Alta Velocidade, porém o traçado seguia apenas até Santo Ovídio onde estaria planeada uma estação subterrânea. Assim, em 2023, foi proposta uma Solução C, que corresponde a um trecho desde a estação subterrânea de Santo Ovídio até à estação da Campanhã, o qual contém uma nova ponte sobre o rio Douro. Para além da divisão do traçado em trechos, de forma a proceder com a melhor decisão de traçado na AIA, as próprias soluções foram divididas em partes. Deste modo, a decisão sobre qual o melhor traçado foi proposta na AIA de julho de 2023 é a seguinte:

B1 – ILBA S. João de Loure – A2 – A3 – ILAB Loureiro – B5 – A5 – A6 – Variante de Monte Mourão – Variante de Vila Nova de Gaia – Solução C

Na Figura 4.1 encontra-se o traçado decidido no AIA, marcado a verde, bem como as diferentes partes do traçado.

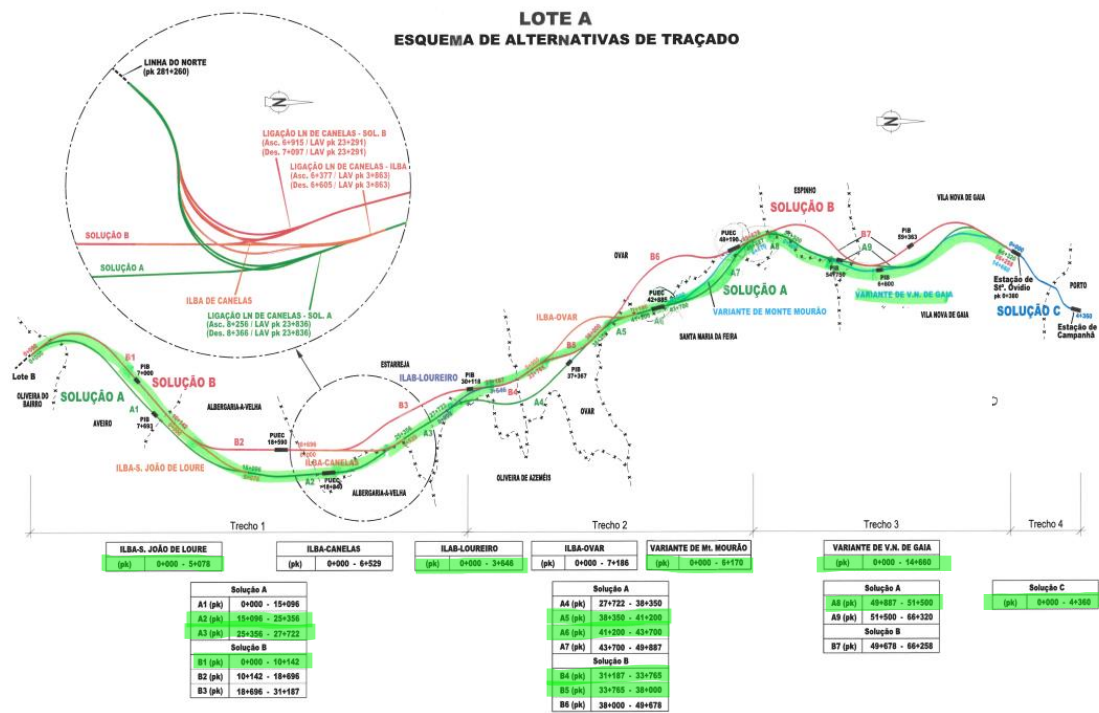


Figura 4.1 Traçado aprovado na Declaração de Impacte Ambiental (DIA) de julho de 2023.

4.2 Enquadramento Geológico

Os 70 km do Lote A atravessam vários terrenos e zonas, com litologias com idades a variar entre o Cretácico em Aveiro a rochas que datam do Câmbrico e Pré-Câmbrico no Porto e em Vila Nova de Gaia. Dado tratar-se de uma zona de tal forma extensa, os territórios que atravessa foram já afetados por diversos eventos tectónicos que os transformaram e que levam à necessidade de um estudo aprofundado.

4.2.1 Tectónica

O estudo tectónico da área de estudo é de elevada importância dado que, como foi referido anteriormente, grande parte das diversas litologias que poderão ocorrer na zona foram afetadas por Ciclos de Wilson, sendo o mais importante para o caso em estudo o Ciclo Varisco. Além do próprio ciclo, determinadas estruturas têm um grande papel nas litologias, sendo uma delas inclusive atravessada pelo traçado da Linha de Alta Velocidade – a Zona de Cisalhamento Porto-Tomar-Ferreira do Alentejo.

4.2.1.1 *Ciclo Varisco*

Primeiramente, um Ciclo de Wilson trata-se da sequência de processos que leva à abertura e posterior fechamento de um oceano. Este fechamento leva à colisão entre placas continentais, que provoca um engrossamento da crosta e a formação de montanhas e supercontinentes, sendo esta a última fase do ciclo, também denominada por Orogenia (Grotzinger & Jordan, 2014). Embora esta definição exista, deve ser aplicada aos contextos de ciclos reais, e no caso do Ciclo Varisco algumas questões permanecem por responder.

Antes do Ciclo Varisco começar decorria nos terrenos do Gondwana um outro Ciclo, o Ciclo Cadomiano, que terá afetado terrenos da Zona de Ossa Morena (ZOM) e da Zona Centro Ibérica (ZCI), embora na segunda os indicativos da deformação que decorreu neste ciclo sejam raros e pouco observáveis. As fases finais do Ciclo Cadomiano ter-se-ão dado na fronteira entre o Ediacárico e o Câmbrico, de acordo com a datação de rochas e microestruturas por diversos autores, citados por (Simancas, 2019). Embora existam estas evidências, e outras, para que o Ciclo Cadomiano se tenha dado até ao limite entre os dois períodos, outras evidências existem que dificultam a distinção entre os dois ciclos, uma das quais a ocorrência de magmatismo durante o Câmbrico e o Ordovícico, que pode ser relacionado com uma subducção contínua desde

o Proterozoico ou um evento de *rifting* separado. Esta segunda hipótese é apoiada por vários autores (Bea et al., 2007; Quesada et al., 1990) como sendo correspondente ao início do Ciclo Varisco no Câmbrio inferior ou médio. Quanto ao final do Ciclo Varisco, já não ocorre tamanha ambiguidade, dado que a deformação se deu particularmente no Carbonífero Superior até ao Pérmico inferior, sendo esta idade também de rochas magmáticas calc-alcálicas que terão intruído num contexto tardi a pós orogénico, observando-se uma grande mudança para as rochas vulcânicas alcalinas que se terão formado durante o Pérmico superior e o Triássico (Simancas, 2019).

Como referido acima, a fase final de um Ciclo de Wilson trata-se por Orogenia, sendo responsável pela formação de cadeias montanhosas aquando da colisão de placas continentais. Assim, a Orogenia Varisca deu-se aquando do embate da Laurussia (composta pela Laurásia, Báltica e outros microcontinentes) e o Gondwana. Vários indícios deformacionais, metamórficos e magmáticos mostram que as fases finais do Ciclo Varisco se terão dado durante o Carbonífero superior e o Pérmico inferior, denominando esta fase como terceira fase de deformação – D₃ (Simancas, 2019). Esta fase é fundamental no que toca ao estudo das estruturas que afetam as litologias apresentadas nos próximos subcapítulos, nomeadamente naquelas onde será feita a escavação de túneis, dado que estruturas relacionadas com diferentes orogenias terão comportamentos diferentes.

Embora os terrenos variscos pertencentes àquilo que foi a Laurussia se encontrem bastante definidos, no caso dos terrenos do Gondwana o mesmo não acontece, dado terem sido posteriormente afetados pela Orogenia Alpina (Simancas, 2019).

Na Ibéria, os terrenos mais antigos pertencentes ao Orógeno Varisco encontram-se representados no Maciço Ibérico, numa zona da colisão entre a Laurussia e o Gondwana, no qual ocorreu um reaproveitamento da crosta do Gondwana.

4.2.1.2 Zona de Cisalhamento Porto-Tomar-Ferreira do Alentejo

Embora existam variadas estruturas tectónicas que podem afetar os materiais na zona do traçado, a maior e mais importante trata-se da Zona de Cisalhamento Porto-Tomar-Ferreira do Alentejo (ZCPTF). Esta zona de cisalhamento de orientação NNW-SSE é caracterizada por apresentar uma cinemática direita em regime dúctil a dúctil frágil, e a sua origem permanece sob discussão, sendo uma das teorias a que dita que esta se terá formado durante o Devónico, reativando uma sutura de idade anterior, possivelmente de idade Pré-Câmbria (Dias & Ribeiro, 1993). Porém outras

interpretações ditam que a ZCPTF estava ativa apenas durante o Mississippiano (M. F. Pereira et al., 2010).

Segundo os autores (Ribeiro et al., 2007, 2009), no fim da orogenia Cadomiana, formou-se uma sutura contínua antes do deslocamento da paleotransformante Porto-Tomar-Ferreira do Alentejo, no início do Ciclo de Wilson Varisco, resultando na separação da placa Finisterra da placa Ibérica. Este movimento é responsável pela localização desconhecida da sutura Cadomiana na placa Finisterra, que se individualiza na placa Ibérica. Nesta, a sutura Cadomiana é representada pela Zona de Cisalhamento Tomar-Badajoz-Córdoba, que é reativada em regime intraplaca, associada a processos transgressivos sinistrogios, durante o Ciclo de Wilson Varisco.

Esta zona de cisalhamento estende-se, como dita o nome, desde o Porto até à zona de Ferreira do Alentejo, separando zonas tectonoestratigráficas, a ZCI e os Terrenos Finisterra, na zona mais a norte, e a ZCI e a ZOM, mais a sul. De acordo com as Cartas Geológicas e Neotectónicas a ZCPTF atravessa a Linha de Alta Velocidade na zona de Vilar do Paraíso em Vila Nova de Gaia, mais concretamente na pedreira “Lages Nº7”, onde já foi explorado o Granito da Madalena e onde se planeia que se localizem o emboquilhamento de saída do Túnel de Negrelos e o emboquilhamento de entrada do Túnel de Vila Nova de Gaia, tornando esta já sensível situação ainda mais problemática.

4.2.2 Zonas Tectonoestratigráficas

O Maciço Ibérico ou Hespérico trata-se de uma estrutura formada durante a Orogenia Varisca, que ter-se-á dado entre o Carbonífero e o Pérmico. Pese embora o maciço se tenha formado nesse período, as rochas que o compõem pertencem a períodos anteriores, desde o Proterozoico ao Carbonífero (Ribeiro et al., 1979). Este maciço faz parte da Cadeia Varisca Europeia, ou Soco Varisco Europeu, criada pelo choque dos continentes Laurência-Báltica e Gondwana, nos quais estiveram envolvidos mais alguns pequenos continentes, como a Avalónia, a Armórica e a Finisterra. Este choque intercontinental veio a dar origem ao supercontinente Pangeia (Moreira, 2012).

Esta estrutura ocupa grande parte da zona mais a ocidente da Península Ibérica, e insere-se nas várias unidades, ou zonas, anteriormente referidas, como é possível ver na Figura 4.2. Estas zonas foram definidas por Lotze (1945), usando o carácter petrológico da rocha e a litoestratigrafia como características distintivas, porém em esta definição foi revista por Julivert em 1974, que utilizou as estruturas variscas como

limites. A definição hoje utilizada foi ligeiramente modificada por Ribeiro et al. (1990), que separou os terrenos alóctones da Zona Centro Ibérica numa zona separada – Zona de Galiza Trás-os-Montes – não existindo outras mudanças nas restantes zonas.

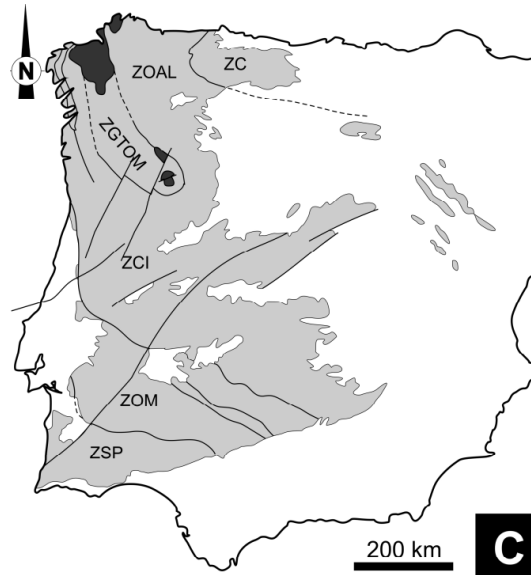


Figura 4.2 Divisões do Maciço Ibérico, a cinzento-claro, de acordo com Ribeiro et al. (1990): ZC - Zona Cantábrica, ZOAL - Zona Oeste-Asturo-Leonesa, ZGTOM - Zona de Galiza-Trás-os-Montes, ZCI - Zona Centro-Ibérica, ZOM - Zona de Ossa-Morena, ZSP - Zona Sul Portuguesa. A preto encontram-se os terrenos alóctones da ZGTOM (adaptado de Moreira, 2012).

As litologias nas quais passa a Linha de Alta Velocidade pertencem a três das zonas tectonoestratigráficas existentes na Península Ibérica: a Zona Centro-Ibérica (ZCI), a Zona de Ossa-Morena (ZOM) e a Orla Ocidental Portuguesa, ou Orla Mesocenozóica Ocidental. Na Figura 4.3 encontra-se o mapa das zonas tectonoestratigráficas de Portugal, no qual está marcado a vermelho o traçado da Linha de Alta Velocidade de modo a perceber os terrenos que atravessa.

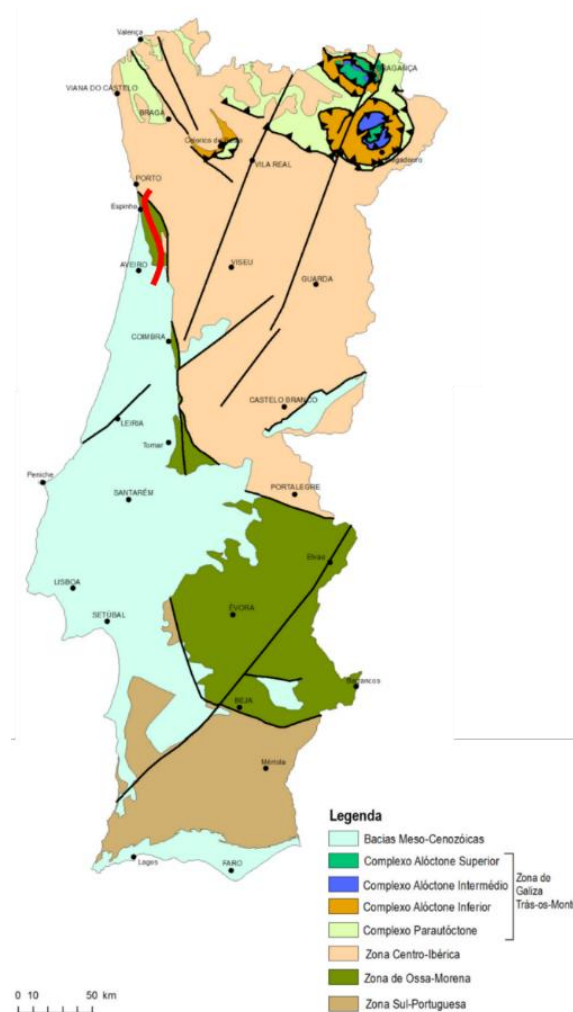


Figura 4.3 Mapa das zonas tectonoestratigráficas, marcado a vermelho trata-se do traçado da Linha de Alta Velocidade (retirado da Carta Geológica de Portugal à Escala 1:1 000 000).

4.2.2.1 Orla Mesozóica Ocidental

Começando de Sul para Norte, os primeiros terrenos atravessados pela Linha de Alta Velocidade correspondem à Orla Mesozóica Ocidental, também referida como Bacia Lusitânica, que, tal como o nome indica, se trata de uma bacia criada durante a abertura do Atlântico Norte, no Mesozóico. Trata-se de uma bacia intracratónica e interna, dado que está separada da zona externa pelo *horst* das Berlengas, a oeste (Ribeiro et al., 1979; Wilson, 1988).

A deposição de sedimentos dá-se entre o Triássico Superior até ao Cretácico Superior, porém, devido a diversos episódios de inversão tectónica, diferentes zonas dentro da bacia ficaram submersas em diferentes períodos, o que causa algumas lacunas na estratigrafia. No setor meridional da Orla Mesozoica é possível observar uma

maior complexidade dado que na zona de Sintra e Lisboa para além da deposição dos sedimentos do cretácico e posteriormente do Miocénico, ocorreu a intrusão de rochas plutónicas em Sintra e a instalação do Complexo Vulcânico de Lisboa, ambos durante o Cretácico Superior e relacionados com o processo de *rifting* associado à abertura do Atlântico Norte (Ribeiro et al., 1979).

Para além dos processos de inversão tectónica responsáveis pelas lacunas estratigráficas, a bacia foi ainda afetada por processos de *rifting*, dois dos quais estão diretamente relacionados com a abertura do Atlântico Norte. O primeiro, durante o Triássico Superior e o Jurássico Inferior, ter-se há tratado de um *rift* abortado, ou seja o processo não terá sido finalizado, não criando a crosta oceânica. Além disto, o relevo da zona foi modificado dando lugar a uma topografia irregular, resultado da reativação de falhas de origem anterior à da própria bacia. Já no segundo, durante o Jurássico Superior, foi produzida crosta oceânica, o que levou à abertura do oceano entre a Ibéria e Newfoundland¹ (Ribeiro et al., 1979; Wilson, 1988).

4.2.2.2 Zona de Ossa Morena

A Zona de Ossa Morena (ZOM), trata-se de um dos terrenos autóctones do Maciço Ibérico, cuja evolução geodinâmica ainda não apresenta uma explicação completamente consensual, dado existirem opiniões divergentes entre vários autores. Rochas no setor mais setentrional da ZOM apresentam evidências de terem sido afetadas por um Ciclo de Wilson antes de serem afetadas pelo Ciclo Varisco, que correspondem à deformação observadas em rochas do Maciço Armórico, pertencentes ao pré-histórico continente Armórica. Esta deformação não é possível de observar nas restantes zonas do Maciço Hespérico, o que apoia o modelo em que a ZOM, possivelmente parte da antiga Armórica, terá colidido com a Ibéria durante o Ciclo Varisco, formando uma sutura que terá sido mais tarde reativada como uma zona de cisalhamento direita – Zona de Cisalhamento Tomar-Badajoz-Córdova (ZCTBC) (Ribeiro et al., 1979). Este modelo é apoiado pela litoestratigrafia de todo o Maciço Hespérico, no qual, até ao Câmbrico, não há correspondência entre a ZOM e ZCI. Em 1975, Azor et al., no qual se realizou a datação de Rb-Sr dos materiais no contacto entre as duas zonas tectonoestratigráficas, na qual se concluiu que a ZCTBC se trata de uma sutura de idade varisca.

¹ Newfoundland trata-se de uma ilha no lado Atlântico do Canadá, da qual parte se encontrava unida à Península Ibérica antes da abertura do Atlântico Norte.

As litologias nesta zona tectonoestratigráfica tratam-se de rochas maioritariamente metassedimentares e magmáticas, sendo mais comuns rochas de origem vulcânica do que plutónica. Os metassedimentos datam desde o Pré-Câmbrico até ao Devónico, não tendo ocorrido deposição de sedimentos até ao Miocénico, no qual houve deposição de sedimentos continentais. Quanto às rochas magmáticas estas instalaram-se durante o ciclo hercínico, e foram classificadas em 3 grupos: pré-orogénicas, de idades compreendidas entre o Câmbrico superior e o Ordovícico Inferior; sin-orogénicas, de idade Carbonífera; e tardi a pós-orogénicas a datar entre o Carbonífero superior e o Pérmico inferior (Carta Geológica de Portugal à Escala 1:1 000 000, 2010).

A ZOM é aqui referida dado que a Linha de Alta Velocidade atravessa alguns terrenos daquilo que seria o Bordo NW desta zona, os quais se encontrariam a oeste da Zona de Cisalhamento Porto-Tomar-Ferreira do Alentejo (ZCPTF). Estes terrenos foram referidos como parte da Faixa Blastomílonítica, na qual se encontram incluídos os materiais mais antigos da ZOM, a datar do Proterozoico, porém, na última década começou a ser mencionado um novo terreno tectonoestratigráfico ao qual estes terrenos poderão pertencer, os Terrenos Finisterra (Carvalho et al., 2019; Moreira et al., 2020; Ribeiro et al., 2007; entre outros).

4.2.2.3 Terrenos Finisterra

Os Terrenos Finisterra, como referido acima, tratam-se de um terreno tectonoestratigráfico que apenas na última década começou a ter maior pesquisa dedicada, dado que anteriormente estes terrenos eram considerados como parte da ZOM. Após variados estudos destes terrenos “exóticos” determinou-se que os mesmos teriam uma relação com o Bloco de Léon, no norte do Maciço Armórico e com o *Mid-German Crystalline Rise* (MGCR), um domínio na Europa Central, sendo feita uma proposta por Moreira et al. em 2020 em classificar estes como um novo terreno tectonoestratigráfico: o Terreno Finisterra-Léon-MGCR. Este encontra-se materializado em Portugal no Terreno Finisterra, do qual afloram materiais em quatro setores: Porto-Espinho-Albergaria-a-Velha, Coimbra e Abrantes-Tomar e o Arquipélago das Berlengas. Existe uma ligação entre os setores, porém esta não é observável dada a cobertura da Orla Mesozoica (Moreira, Romão, et al., 2019). Na Figura 4.4 encontra-se um panorama geral do Terreno Finisterra em Portugal.

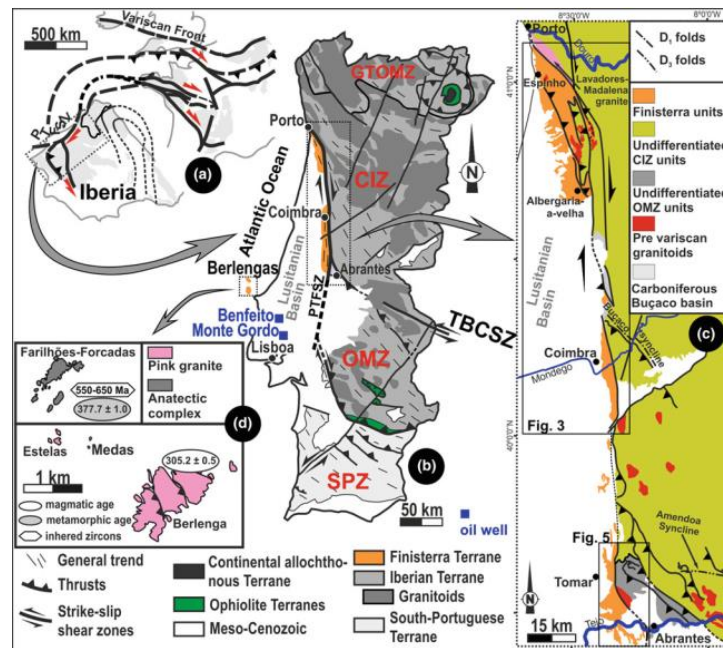


Figura 4.4 O Terreno Finisterra no contexto do Varisco Europeu: a) Arco Ibero-Armoricano, b) Contexto geral do Terreno Finisterra, c) Secções do Terreno Finisterra na zona junto à Zona de Cisalhamento Porto-Tomar-Ferreira do Alentejo, d) Arquipélago das Berlengas (retirado de Moreira et al., 2020).

Este terreno encontra-se limitado a este pela ZCPTF, fazendo fronteira com a ZCI nos setores de Porto-Espinho-Albergaria-a-Velha e de Coimbra e com a ZOM no setor Tomar-Abrantes. A oeste, porém, não é possível identificar o limite dado que se encontra abaixo dos sedimentos da Bacia Lusitânica, existindo estudos que o limite oeste se trata de uma sutura oceânica de idade varisca (Faure et al., 2010; Franke, 2000; Franke & Dulce, 2017). Dos quatro setores do Terreno Finisterra é especialmente importante o setor Porto-Espinho-Albergaria-a-Velha, dado ser atravessado pelo traçado da Linha de Alta Velocidade, e a ele pertencem várias unidades de idade proterozoica.

Durante o Mississippiano, no Carbonífero, ocorria o começo da colisão entre a Laurentia, da qual fazia parte o Terreno Finisterra, e o Gondwana, do qual fazia parte a Ibéria, o que leva à crença por parte de alguns autores que foi neste período que ocorreu a colisão do Terreno Finisterra com a Ibéria. Este modelo é apoiado pela evolução semelhante entre o Terreno Finisterra-Léon-MGCR e os terrenos pertencentes ao Gondwana após este período. Esta colisão afeta a tectónica do Terreno Finisterra pois sobrepõem-se aos primeiros eventos do Ciclo Varisco (Moreira, Romão, et al., 2019). De acordo com alguns autores, esta colisão coincidiu com um evento metamórfico de altas temperaturas causado pelo movimento esquerdo da ZCPTF (Moreira et al., 2017; Moreira, Noronha, et al., 2019).

4.2.2.4 Zona Centro Ibérica (ZCI)

A Zona Centro Ibérica corresponde, como é possível ver na Figura 4.3, à maioria do território Centro e Norte de Portugal e é delimitada por dois importantes acidentes tectónicos, a ZCTBC, a sul, e a ZCPTF a oeste. Esta última de elevada importância neste relatório dado que afeta um dos túneis da Linha de Alta Velocidade.

A ZCI, tal como a ZOM, tem como base o Maciço Ibérico, ou seja materiais depositados durante o Pré-Câmbrico superior e o Câmbrio e fortemente afetados pela Orogenia Varisca. Acima dos materiais do Maciço Ibérico ocorreu deposição na ZCI entre o Ordovícico e o Carbonífero superior (Vilas et al., 1990). Além dos materiais metassedimentares, neles intruíram várias rochas de origem magmática, maioritariamente plutónicas. Como referido para a ZOM, a origem das rochas está relacionada com o ciclo hercínico, e foram classificadas nos mesmos grupos – pré-orogénicas, sin-orogénicas e tardi a pós-orogénicas (Carta Geológica de Portugal à Escala 1:1 000 000, 2010).

4.2.3 Unidades Litológicas

O traçado da Linha de Alta Velocidade interceta várias litologias com rochas de variadas origens. Na zona de Aveiro, correspondente ao início do traçado interceta as rochas com origem sedimentar da Bacia Lusitânica, passando depois às unidades metamórficas dos Terrenos Finisterra, os granitos associados com a ZCPTF, e por fim os metassedimentos e rochas magmáticas na ZCI.

Neste capítulo é feita uma abordagem a cada uma das Unidades atravessadas pela Linha de Alta Velocidade, de modo a entender que rochas a compõem e as suas idades, encontrando-se ordenadas desde a unidade mais antiga até à mais recente, encontrando-se no final as rochas graníticas dado que a sua idade não é classificada pela tabela cronoestratigráfica. Ainda em relação às idades das unidades e formações apresentadas, no caso das rochas metamórficas e magmáticas a mesma foi calculada com métodos de datação quer da rocha inteira como dos zircões que ocorrem nas rochas por derivados métodos, entre os quais U-Pb, Rb-Sr e Sm-Nd; porém, no caso das rochas sedimentares da Bacia Lusitânica, a sua idade foi identificada através dos mais derivados fósseis lá encontrados e correlações com outras formações semelhantes que se encontrassem mais a sul ou na Orla Algarvia.

As unidades e formações apresentadas neste subcapítulo são as referidas pela IP no Estudo Prévio que foi realizado em 2024 e que aparecem retratadas, quer nas Plantas-Perfil, quer na legenda da mesma. Ambas peças escritas e desenhadas tiveram como referências as Cartas Geológicas à escala 1:50 000, e dado que as cartas utilizadas datam na sua maioria de 1950/1960, alguma da informação pode encontrar-se um pouco desatualizada com base nos estudos feitos em anos mais recentes. Será também dada uma maior relevância às unidades e formações nas quais, de acordo com o projeto da IP, poderão existir túneis ou estações subterrâneas, dado que é nestes casos que o estudo geológico tem um maior peso, não descartando o estudo das outras unidades e formações.

4.2.3.1 *Unidade de Espinho –Xge*

A Unidade de Espinho estende-se numa estreita faixa que começa perto de Espinho e desaparece perto de S. Martinho da Gândara, sendo atravessada pela Linha de Alta Velocidade em apenas cerca de 2 km do traçado na zona próxima a Travanca. Os limites desta Unidade são o contacto com a Unidade de Arada a Sudoeste, o contacto com a Unidade de Lourosa a Nordeste, e, a Noroeste desaparece por baixo dos depósitos aluvionares em Espinho (LNEG, 2010; Teixeira, 1963; Teixeira & Perdigão, 1962).

A formação desta unidade está relacionada com um episódio de elevado grau de metamorfismo que deu origem a micaxistos, também referidos como micaxistos porfiroblásticos, com minerais de granada e estauroilite, acinzentados e muito alterados e filões quartzíticos (Teixeira & Torre de Assunção, 1963). A idade aproximada destas rochas foi determinada em 2014 num estudo realizado por Almeida et al. (2014), no qual foi feita a datação por U/Pb de zircões presentes nas diferentes unidades do Terreno Finisterra. Assim, Almeida chegou à conclusão de que a Unidade de Espinho apresenta uma idade compreendida entre ≈ 535 Ma e ≈ 670 Ma, o que, correspondente aos períodos do Câmbrio inferior e do Neoproterozoico.

4.2.3.2 *Unidade de Lourosa – Xyz*

A Unidade de Lourosa estende-se por uma grande superfície de terreno, desde a praia da Madalena até próxima da zona de Oliveira de Azeméis, onde desaparecem sob carreamentos com metassedimentos da Zona Centro-Ibérica. A Nordeste esta unidade contacta com os Granitos de Lavadores e com as formações do Ordovícico da ZCI –

nomeadamente a Formação de Valongo – e a sudoeste com a Unidades de Espinho e Arada (Cândido de Medeiros & Teixeira, 1963; LNEG, 2010; E. Pereira et al., 2006; Teixeira, 1963; Teixeira & Perdigão, 1962). A Linha de Alta Velocidade atravessa esta unidade quer à superfície, quer em subterrâneo, dado que vários dos túneis se encontram nesta unidade, ao todo mais de 3 km em subterrâneo nesta unidade, o que implica a necessidade de um estudo ainda mais intenso sobre a Unidade de Lourosa.

Esta unidade foi dividida em dois setores dada a diferença substancial entre o grau de metamorfismo: um setor inferior composto por paragnaisses e migmatitos e um setor superior composto por micaxistos. Em ambos os setores, para além das litologias referidas, também ocorrem anfíbolitos. O setor inferior, mais antigo, ocorre mais a norte na Unidade de Lourosa, enquanto o setor superior, mais recente, ocorre mais a sul (Carvalho et al., 2019; Moreira, Noronha, et al., 2019). Chaminé (2000) dita a idade desta unidade como Neoproterozoica, tendo se datado uma população de zircões com idade entre por volta de 540 Ma e 650 Ma (Câmbrico inferior a Ediacário) porém Almeida et al. (2014) coloca esta teoria em questão dado que os zircões datados apresentam idades mais recentes desde o Câmbrico inferior ao Devónico, mantendo-se um debate sobre a idade desta unidade.

4.2.3.3 *Unidade de Arada – X*

A Unidade de Arada é a mais trespassada pela Linha de Alta Velocidade, porém ao contrário da Unidade de Lourosa não é atravessada por nenhum túnel. Estende-se desde Espinho até à zona de Albergaria-a-Velha, limitada a nordeste pelas Unidades de Espinho e de Lourosa e ainda pelas formações ordovícicas da ZCI, e a sudoeste fica sob aluviões e sedimentos da Orla Mesozoica Ocidental que depositaram por cima da Unidade de Arada (LNEG, 2010; E. Pereira et al., 2006; Teixeira, 1963, 1975; Teixeira & Perdigão, 1962).

As rochas que compõem a Unidade de Arada são xistos e micaxistos cloríticos, clorítico-serícíticos e serícítico-biotítico-moscovítico, e ainda micaxistos porfiroblásticos de granada e andaluzite (Teixeira, 1981). A sua idade, tal como no caso da Unidade de Lourosa encontra-se em debate, porém, Beetsma (1995) obteve as idades entre os 550 e os 600 Ma para unidades semelhantes no maciço Ibérico, portanto alguns autores consideram o Neoproterozoico como a idade mais aproximada desta unidade. Antes da proposta sobre os terrenos Finisterra, esta unidade era considerada uma continuação da “Série Negra” encontrada na Zona de Ossa Morena (Teixeira, 1981).

4.2.3.4 *Supergrupo Dúrico-Beirão – CXG*

Supergrupo Dúrico-Beirão, também referido na bibliografia como Complexo Xisto-Grauváquico (CXG) faz parte do Maciço Hespérico na ZCI e encontra-se em diversos locais desta zona, dividido em três grupos: Grupo das Beiras, Grupo do Douro e Grupo de Arda-Marofa (LNEG, 2010). A Linha de Alta Velocidade passa no CXG Indiferenciado, e embora não sejam muitos quilómetros, atravessa-o em túnel e em parte da Estação de Santo Ovídio, o que obriga a um estudo aprofundado desta unidade litológica.

O CXG neste local é maioritariamente composto por gnaisses, migmatitos e micaxistos, os dois primeiros derivados, em grande parte, da intrusão dos granitos do Porto e da Madalena no CXG (Silva, 2005). O CXG, designação que recebeu por Costa (1950) e ainda hoje continua a ser utilizada, foi primeiramente identificado como Série Xistosa das Beiras por Delgado (1908), tendo mais tarde sido redefinido como Hispaniano por Teixeira (1981), e por fim denominado com a nomenclatura atual, por Supergrupo Dúrico-Beirão por Silva et al. (1988). A sua deposição deu-se entre 565 e 500 Ma, ou seja no final do Neoproterozoico até ao Câmbrico, tornando-a mais recente ou contemporânea, dependendo das unidades, dos materiais do Terreno Finisterra (Vidal et al., 1994).

4.2.3.5 *Arenitos de Eirol – T*

Os Arenitos de Eirol tratam-se de uma unidade que é equivalente aos Grés de Silves encontrados na Orla Algarvia, e representam a base das Orlas Meso-Cenozoicas Portuguesas, sendo os mais antigos sedimentos depositados já após o Carbonífero. Encontram-se à superfície nas margens dos rios Vouga e Águeda entre Eirol e Águeda, e para sul estende-se ininterruptamente quase até Tomar, sempre junto da ZCI ou dos Terrenos Finisterra onde estes afloram (LNEG, 2010; Teixeira, 1975). Embora não seja atravessada em túnel, nesta litologia assentam as fundações dos pilares de algumas pontes e viadutos da Linha de Alta Velocidade.

Como referido, os Arenitos de Eirol equivalem aos Grés de Silves, mais concretamente a Formação da Conraria (Palain, 1976), representada por arenitos vermelhos, compostos de sedimentos mais finos no topo e mais grosseiros na base, chegando a ser possível observar conglomerados com blocos de granito, quartzo e quartzito (Teixeira & Zbyszewski, 1976).

4.2.3.6 Cretácico – C

Dado que as formações presentes do Cretácico se encontram numa pequena parte do trajeto da Linha de Alta Velocidade e não contém obras subterrâneas, retirando os

Grés de Palhaça – C¹

Grés de Palhaça trata-se de um dos nomes dados à unidade conhecida como Grés Grosseiro Inferior ou Arenitos do Carrascal (Barbosa, 1981b; Pais & Trincão, 1983), possível de encontrar em afloramentos em toda a Orla Ocidental e, na zona em questão, depositada diretamente em cima dos sedimentos do Triásico devido a uma das regressões tectónicas que ocorreram ao longo do Mesozoico na Bacia Oceânica (Callapez, 1999; SGP, 1992a, 1992b). É atravessada pela Linha de Alta Velocidade numa estreita faixa em viaduto, na parte inicial do traçado.

São grés grosseiros a muito grosseiros por vezes com pedaços de cascalheira mal calibrados, geralmente apresentam uma cor acinzentada mas é comum que possam aparecer laivos vermelhos, amarelos ou violetas (Barbosa, 1981b).

Calcários de Mamarrosa – C²

Tal como visto nas formações anteriores, esta formação tem uma equivalência com outras que existam em outros locais da Bacia Lusitânica ou com termos mais abrangentes que alberguem estas unidades. Os Calcários de Mamarrosa, intercetados pela Linha de Alta Velocidade antes de uma das pontes de maior comprimento, pertencem à “Formação Carbonatada”, referida por (Soares, 1967), e afloram em pequenas manchas ao longo das margens de vários dos rios que atravessam a Bacia Lusitânica (SGP, 1992b, 1992a).

Os Calcários de Mamarrosa são, essencialmente, calcários, margas e outras rochas com componente calcária, por vezes com cores escuras entre o negro e o cinzento escuro (Barbosa, 1981b).

Grés do Furadouro – C³

Os Grés do Furadouro ocorrem também em pequenas manchas junto dos Calcários de Mamarrosa e aparecem referidos na bibliografia com este mesmo nome. A Linha de Alta Velocidade atravessa esta formação logo no início do traçado (Barbosa, 1981a; SGP, 1992b, 1992a).

Em termos litológicos é composto por grés grosseiros de quartzosos a subarcósicos, com uma cor amarelada ou acastanhada, que se tornam mais finos e micáceos na base (Barbosa, 1981b).

Grés de Oia – C³⁻⁴

Grés de Oia é uma formação referida com este nome por (Barbosa, 1981b), correspondendo ao “Grés Grosseiro Superior” de Soares (1967), entre outras formações encontradas na Orla Mesozoica com diferentes nomenclaturas, particularmente no setor norte da mesma, não sendo encontrada nenhuma formação semelhante e da mesma idade abaixo da Figueira da Foz (SGP, 1992b, 1992a). Esta é uma formação atravessada pela Linha de Alta Velocidade numa muito curta faixa, no início do traçado.

Barbosa (1981b) descreve os Grés de Oia como alguma diferença na base, no meio e no topo. Assim, descreve a base como sendo “grés finos argilosos e argilas micáceas com vestígios de matéria orgânica”, o meio como “grés grosseiro, mal calibrado, localmente arcósico a subarcósico, (...) cor amarelada ou acinzentada, com frequentes manchas vivas avermelhadas e vinosas”, e por fim no topo “tornam-se mais bem calibrados e as manchas avermelhadas e/ou vinosas vão desaparecendo gradualmente”.

Grés da Verba ou Arenitos do Mamodeiro – C⁴

Embora apresentem dois diferentes nomes, Grés da Verba, referido por Barbosa (1981b), e Arenitos do Mamodeiro, por Teixeira & Zbyszewski (1976), trata-se da mesma formação, e, tal como foi o caso da formação anterior, aflora apenas no extremo norte da Bacia Lusitânica (SGP, 1992b, 1992a). É, das formações do Cretácico, a mais atravessada pela Linha de Alta Velocidade sendo, inclusive, atravessada por um túnel.

São referidos como Arenitos do Mamodeiro por Teixeira & Zbyszewski (1976), e descritos como “arenitos claros, com intercalações de argilas e alguns leitos conglomeráticos”. Barbosa (1981b) refere esta formação como Grés da Verba e descreve-a como “grés grosseiro a muito grosseiro, razoavelmente calibrado, arcósico na base e quartzo-argiloso no topo, (...) esbranquiçado ou acinzentado, apresentando algumas manchas de cor avermelhada ou rosada, com os feldspatos alterados dando à matriz um ponteadado branco”

4.2.3.7 Depósitos do Quaternário – Q

Os depósitos de cobertura do Plistocénico ocorrem um pouco por todo o traçado, tratando-se de depósitos de praias antigas e terraços fluviais, podendo estender-se até uma profundidade de 130 metros nos locais mais espessos. São materiais sedimentares, nomeadamente seixos rolados e areias argilosas, podendo apresentar na base blocos graníticos caulinizados, processo esse posterior à formação do depósito (Teixeira et al., 1962).

4.2.3.8 Depósitos Modernos – Al ou At

Os depósitos Modernos neste traçado tratam-se maioritariamente de formações aluvionares, existentes na proximidade das várias linhas de água que o traçado atravessa, e aterros, materiais de associados a diversas atividades de origem antrópica.

No caso dos depósitos aluvionares, estes tratam-se na sua maioria de solos arenosos de granulometria média a siltosos, podendo apresentar fácies lodosas em locais mais profundos e em linhas de água de maior ordem, como são o Rio Douro e o Rio Vouga (Carrington da Costa & Teixeira, 1957). Nos locais em que o traçado atravessa uma linha de água de menor ordem, a espessura destes materiais não excede alguns metros, porém, nos rios Douro e Vouga é possível encontrar espessuras de várias centenas de metros.

Os depósitos de aterro, embora de origem antrópica, possuem grande relevância dado cobrirem extensas áreas em todo o traçado. As suas origens encontram-se maioritariamente relacionadas a atividades relacionadas à construção, sendo constituídos por materiais rochosos provenientes de escavações nos arredores de dito aterro, e, por vezes, outros resíduos de origem humana (Carrington da Costa & Teixeira, 1957).

4.2.3.9 Granito do Porto – Ym

Como referido acima o Granito do Porto intruiu no CXG, metamorfizando intensamente as rochas. Estende-se desde Vila Nova de Gaia até à Póvoa do Varzim e, tal como foi o caso do CXG, embora não seja muito atravessado pela Linha de Alta Velocidade, o que é, é em túnel e na estação, o que leva a um forte estudo do granito e das suas propriedades (Carrington da Costa et al., 1957; LNEG, 2010).

Este granito foi descrito por Lacroix (1933) como um granito alcalino, no qual predomina a moscovite sobre a biotite, e contém pequenos cristais de turmalina e granada. A idade do Granito do Porto sofreu algumas modificações, tendo sido calculadas idades desde os 394 ± 58 Ma (Mendes, 1967) a 306 ± 7 Ma (A. Almeida et al., 2014) em rocha total com o método Rb-Sr e 318 ± 2 Ma (A. Almeida, 2001) em zircões e monazites com o método U-Pb. Em 2015, A. Almeida et al. realizou um estudo com o método Rb-Sr para rocha total no qual se precisou a idade 312 ± 7 Ma, confirmando que o Granito do Porto se trata de um granito sintectónico da fase de deformação D₃.

4.2.3.10 Granito da Madalena – Υπγ

O Complexo magmático Lavadores-Madalena é composto por dois importantes corpos graníticos, o Granito de Lavadores e o Granito da Madalena, os quais são bastante semelhantes na sua composição. Estes granitos encontram-se no limite entre a ZCI e o Terreno Finisterra, sendo limitados a nordeste pelos materiais do CXG, a sudoeste pela Unidade de Lourosa e a sul por um outro corpo granítico (LNEG, 2010; Teixeira & Perdigão, 1962). A Linha de Alta Velocidade atravessa, em túnel, o granito da Madalena, o que leva a uma grande importância no seu estudo.

De acordo com Teixeira et al. (1962) este é um “granito porfiroide de grão grosseiro” predominantemente biotítico no qual os macrocristais correspondem a microclina. Embora macroscopicamente não seja possível observar qualquer orientação preferencial, quando observado a microscópio os minerais apresentam indícios de deformação a alta temperatura (Sant’ovaia et al., 2014), que pode indicar uma leve metamorfização. Num estudo conduzido por Martins et al. (2014) foi feita a datação por U-Pb dos zircões em alguns granitos na zona noroeste da ZCI, um deles sendo o granito da Madalena. Embora a datação não tenha sido concordante entre todos os zircões, a idade relativa adquirida por Martins foi de 296 ± 3 Ma, ou seja, o Granito da Madalena trata-se de um granito pós-tectónico, que terá intruído já após a Orogenia Varisca.

4.2.4 Geomorfologia

A Bacia Lusitânica e o Maciço Ibérico para além de se tratarem de grandes estruturas de relevância tectónica e estratigráfica, também permitem a divisão da zona de interesse em dois domínios morfoestruturais.

A Bacia Lusitânica localiza-se na zona mais a sul do traçado, ocupando os seus primeiros cerca de 18 km, estendendo-se ao longo da linha costeira entre Espinho e o sul do país, aumentando a sua extensão para o interior do país na zona de Lisboa. É caracterizada por zonas de planalto, com depressões correspondentes a bacias aluvionares, que se prolongam significativamente a baixas altitudes, apresentando depósitos do Quaternário e modernos acima das litologias de idade Cretácica. As bacias aluvionares por sua vez tratam-se de vales de declive pouco acentuado, como é possível observar no vale aluvionar do Rio Vouga, e respetivos afluentes, que se trata do mais extenso na zona. Este vale apresenta uma outra particularidade na zona de Angeja, encontrando-se num contacto geológico entre os grés e arenitos do Cretácico e os arenitos de Eirol, apresentando esta segunda formação uma maior resistência aos elementos, o que causa uma visível distinção entre a margem sul do vale, mais plana devido aos materiais do Cretácico, e a margem norte, mais escarpada com os materiais do Triásico (Teixeira & Zbyszewski, 1976).

No restante traçado a morfologia encontra-se relacionada com o Maciço Ibérico. Embora as cotas não aumentem significativamente é possível verificar que o terreno se torna irregular e os vales aqui existentes apresentam encostas mais íngremes. Embora mais irregular a geomorfologia continua a ser caracterizada por longas extensões de planalto, com não mais que cerca de 110 metros, ocasionalmente interrompidas por acidentes de maior elevação como são o caso do Monte da Virgem, com 236 metros. Esta elevação encontra-se próxima ao local onde é planeado que se construa a nova Estação Subterrânea de Santo Ovídio. Na direção da costa a altitude vai diminuindo gradualmente, devido a uma série de patamares escalonados interrompidos regularmente pela rede de drenagem. O rio Douro encontra-se nesta zona próximo à sua foz, não obstante é possível observar o vale estreito e profundo em que se encontra, com vertentes escarpadas especialmente na margem norte. Esta morfologia foi condicionada, especialmente, por acidentes da orogenia varisca e pela descida dos níveis da água do mar (Barbosa, 1981b; Teixeira & Zbyszewski, 1976).

4.2.5 Hidrogeologia

Na zona afeta ao traçado são intercetados materiais de diversas origens e que apresentam características hidrogeológicas distintas. Assim, é importante mencionar os dois grandes sistemas aquíferos nos quais se insere o traçado da Linha de Alta Velocidade: o sistema aquífero do Maciço Ibérico e o sistema aquífero da Bacia Lusitânica.

No caso do Maciço antigo, os seus sistemas aquíferos são formados por maciços rochosos de compostos por materiais de origem magmática e metamórfica, tendo o seu comportamento condicionado pelos graus de alteração e fraturação do maciço, bem como pelo preenchimento das fraturas, dado tratarem-se de rochas pouco porosas e, portanto, com uma permeabilidade primária baixa. Os maciços metamórficos existentes tendem a apresentar uma permeabilidade secundária alta, devido não só aos diversos graus de esmagamento da rocha e quantidade de descontinuidades presente, como também à xistosidade subvertical da rocha que causa, em conjunto com os restantes fatores, um elevado escoamento de água no maciço. No maciço magmático, a sua permeabilidade depende apenas da alteração e fraturação da rocha, em que o maciço mais alterado e fraturado à superfície apresenta uma permeabilidade maior do que o maciço são e menos fraturado em profundidade. Relacionados aos maciços rochosos encontram-se os solos residuais, dependendo a sua permeabilidade da percentagem argilosa no solo. Um solo residual mais argiloso apresenta uma menor permeabilidade, podendo causar um aquitardo que fará com que a rocha abaixo fique saturada de água e apresente um comportamento em escavação pior (C. Almeida et al., 2000).

Nos sistemas aquíferos da Bacia Lusitânica, os materiais são sedimentares, na sua maioria arenitos e grés, rochas essas que apresentam uma elevada porosidade, e, por sua vez, permeabilidade. A este sistema pertencem dois importantes subsistemas: o sistema aquífero Cretácico de Aveiro e o sistema aquífero Quaternário de Aveiro (C. Almeida et al., 2000).

O sistema aquífero do Cretácico de Aveiro é constituído por uma série de camadas do Cretácico, formando um sistema de três aquíferos sobrepostos, cada um com diferentes características piezométricas e químicas. O aquífero principal encontra-se no topo do sistema, com dois outros aquíferos abaixo. Todos eles apresentam águas de boa qualidade, com fácies bicarbonatadas magnesianas e sódicas e fácies sulfatadas sódicas, sendo que o aquífero base apresenta níveis piezométricos elevados e águas mais mineralizadas (C. Almeida et al., 2000).

Camadas acima encontra-se o sistema aquífero do Quaternário de Aveiro, localizado nos depósitos de praias antigas do Quaternário, e, tal como no anterior, trata-se de um sistema multiaquífero, com um comportamento confinado a semi-confinado. Contém águas bicarbonatadas cálcicas a cloretadas, sódicas e mistas, e com elevados teores de ferro, para além de possíveis contaminações industriais e salgamento das captações. Ainda assim trata-se de um importante aquífero no que toca ao

abastecimento urbano, após tratamento, e das várias unidades industriais de Aveiro (C. Almeida et al., 2000).

4.2.6 Sismicidade

Em termos de sismicidade, de acordo com a Carta de Intensidade Sísmica Máxima da APA, presente na Figura 4.5 B, as intensidades sísmicas máximas na zona do traçado da Linha de Alta Velocidade terão atingido valores de VI e VI. Quanto à quantificação da ação dos sismos, o Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAEEP) (RSA, 1983) considera que o país se encontra dividido em quatro zonas, A a D por ordem decrescente de risco sísmico. De acordo com esta classificação, na Figura 4.5 A a zona de interesse encontra-se nas zonas C e D, com coeficientes de sismicidade, α , de 0,5 e 0,3, respetivamente.

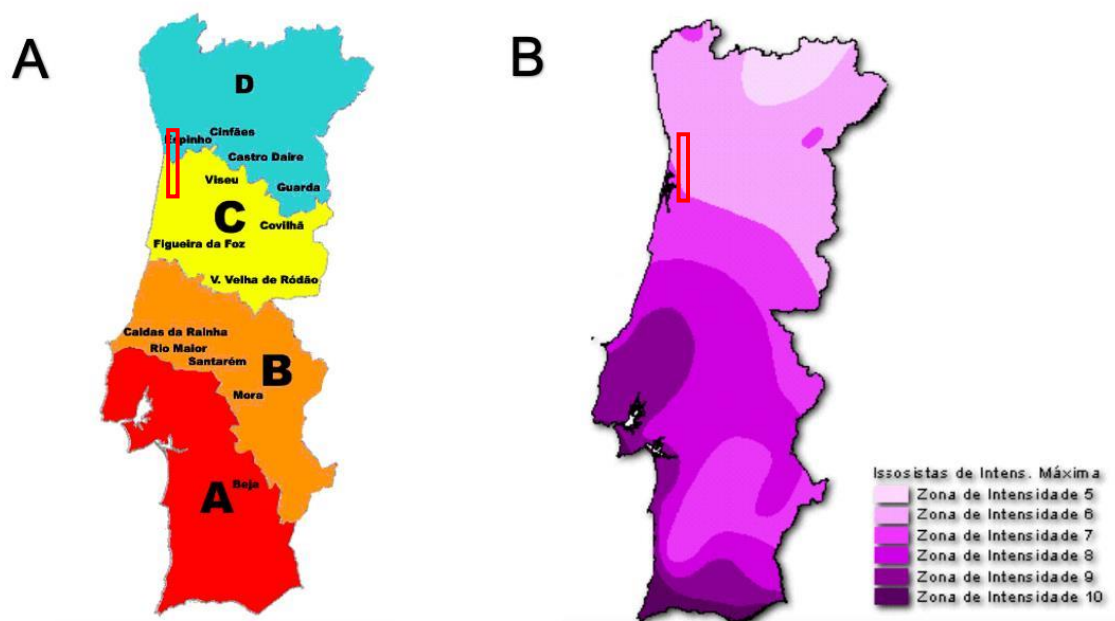


Figura 4.5 A – Mapa de intensidade sísmica (RSA, 1983), B – Carta de Isossistas de Intensidades Máximas (Atlas do Ambiente, 1996).

O RSAEEP apresenta também uma tipologia para os terrenos, com vista à definição do Coeficiente Sísmico de Referência, esta encontra-se representada na Tabela 4.1 e deve ser levada como um elemento orientador.

Tabela 4.1 Tipologia dos terrenos com vista à definição do Coeficiente Sísmico de Referência, (segundo RSAEEP, 1983).

Formações Ocorrentes	Tipo de Terrenos		
	Tipo I	Tipo II	Tipo III
	Rochas e solos coerentes rijos	Solos coerentes muito duros, duros e de consistência média; solos incoerentes compactos	Solos coerentes moles e muito moles; solos incoerentes soltos
Depósitos de praias antigas e de terraços Solos residuais		++	+
Aluviões		+	++
Formações cretácicas	+	++	
Formações triásicas Complexos metamórficos Rochas ígneas	++	+	

No Eurocódigo 8 é também feito um zonamento dependendo do tipo de atividade sísmica, o Tipo 1, representado na Tabela 4.6, trata-se de um cenário no qual o epicentro do sismo se encontraria no oceano atlântico, enquanto o Tipo 2 corresponde ao caso de que o epicentro do sismo se localize próximo, no arquipélago dos Açores ou em território continental. A zona do traçado da Linha de Alta Velocidade localiza-se na zona 1.6 em ação sísmica do Tipo 1, e nas zonas 2.4 e 2.5 em ação sísmica do Tipo 2.

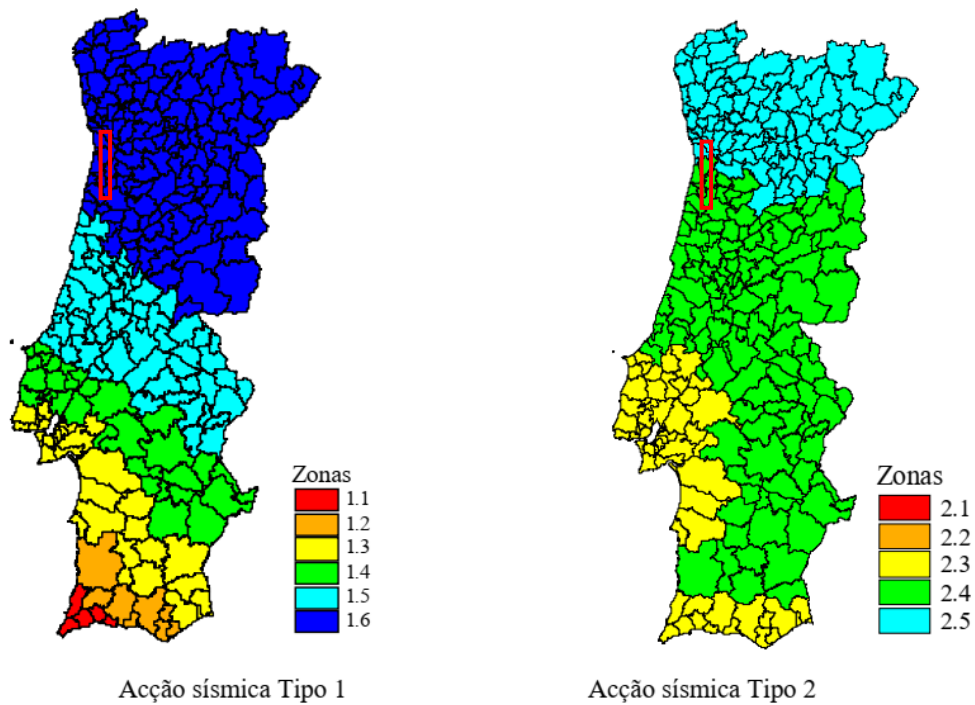


Figura 4.6 Zonamento Sísmico de Portugal, de acordo com o Eurocódigo 8.

4.3 Trabalhos realizados

Como referido, a prospeção utilizada trata-se de uma compilação da prospeção realizada para o Estudo Prévio do Lote A de 2005, trabalhos das campanhas de prospeção para o Lote E de 2006, Lote A de 2007, uma outra campanha do Lote E em 2011 e, por fim, da prospeção complementar realizada entre novembro de 2023 e janeiro de 2024.

4.3.1 Campanhas de Prospeção Anteriores

Os trabalhos de prospeção realizados entre 2005 e 2011 tiveram como objetivo a caracterização geológica-geotécnica dos materiais atravessados pela Linha de Alta Velocidade nas soluções propostas durante esse período. Estes trabalhos são compostos por prospeção *in situ* bem como ensaios laboratoriais a amostras recolhidas. Embora tenham sido realizados um elevado número de trabalhos *in situ* e, por sua vez ensaios laboratoriais, foram considerados para este estudo apenas os trabalhos de prospeção que se encontram a uma distância igual ou menor a 100 metros do traçado aprovado no DIA para o Lote A . Assim, na Tabela 4.2 é possível observar os números totais da prospeção, bem como os números dentro desta que irão ser utilizados.

Tabela 4.2 Quantidade de trabalhos de prospeção realizados em campanhas de prospeção anteriores (IP, 2024^a).

Designação dos Trabalhos de Prospeção	Total	Próximos ao traçado escolhido na DIA para o Lote A (<100 metros)
Poços de reconhecimento – P (Un.)	80	29
Perfis Sísmicos de Refração – PS (Un.)	43	19
Sondagens Mecânicas – S (Un.)	49	16
Furação em solos (m)	819	-
Furação em rocha (m)	186	-
Ensaio SPT (Un.)	580	204
Penetrómetro Dinâmico Super Pesado – DPSH (Un.)	49	25
Penetrómetro Dinâmico Ligeiro – PDL (Un.)	21	6

Em termos de ensaios laboratoriais, realizados com as amostras recolhidas em Poços de Reconhecimento. Estes ensaios foram realizados para caracterização e identificação dos tipos de solos e dos materiais que os compõem. Na Tabela 4.3 encontram-se ambas a quantidade de ensaios totais realizados nas campanhas

anteriores e a quantidade de ensaios realizados em materiais recolhidos próximos ao traçado escolhido no DIA.

Tabela 4.3 Quantidade de ensaios laboratoriais realizados em campanhas de prospeção anteriores (IP, 2024a).

Designação dos ensaios	Total	Em poços de reconhecimento próximos ao traçado aprovado pelo DIA para o Lote A
Granulometria (Penetração)	85	28
Limites de Atterberg	84	28
Azul de Metileno	74	21
Equivalente de Areia	85	28
Teor em Água Natural	87	29
Proctor Modificado	18	13
CBR	17	12

4.3.2 Campanha de Prospeção Complementar

Como referido acima, para além dos trabalhos realizados em anos anteriores durante os Estudos Prévios dos antigos Lotes da Linha de Alta Velocidade, foi realizada, entre o final de 2023 e o início de 2024 uma campanha de prospeção – Campanha de Prospeção Complementar – que visou o traçado aprovado na DIA. Foram realizadas 76 sondagens para o Lote A, todas elas próximas do traçado da DIA, tendo sido feitas ainda 3 sondagens que se localizam próximas do Lote B, das quais 1 fica a mais de 200 metros de distância do traçado do Lote A, e, portanto, não será considerada. Na Tabela 4.4 encontram-se as quantidades dos trabalhos de prospeção e ensaios laboratoriais realizados.

Tabela 4.4 Quantidades de trabalhos e ensaios realizados durante a campanha de prospeção complementar (IP, 2024a).

Designação dos Trabalhos e Ensaios	Total	Próximos ao traçado escolhido na DIA para o Lote A (<100 metros)
Perfis Sísmicos de Refração – PS (Un.)	10	10
Tomografias Sísmicas pelo método Crosshole (Un.)	5	5
Sondagens Mecânicas – S (Un.)	79	78
Ensaios SPT (Un.)	804	796
Penetrómetro Dinâmico Super Pesado – DPSH (Un.)	32	32
Piezómetros (m.)	113	113
Ensaio de Compressão Uniaxial - UCS (Un.)	15	15

4.3.3 Síntese de Resultados

Nos subcapítulos anteriores foi feita uma abordagem à quantidade de trabalhos e ensaios realizados em todas as campanhas de prospeção realizadas para o atual Lote A da Linha de Alta Velocidade. No caso das campanhas mais antigas foi feita uma triagem de modo a determinar quais dos ensaios se encontravam próximos ao traçado aprovado pela Agência Portuguesa do Ambiente na Declaração de Impacte Ambiental. Neste subcapítulo é feita uma síntese de cada conjunto de dados.

4.3.3.1 Perfis Sísmicos de Refração

Nas campanhas anteriores a 2023, como se verifica na Tabela 4.2, foram feitos, ao todos, 43 perfis sísmicos de refração, dos quais 19 se encontram próximos do Traçado aprovado no DIA. Já na campanha de 2023 foram feitos 10 perfis, somando ao todo 29 perfis que serão abordados neste subcapítulo.

A realização destes perfis teve como objetivo o estudo do maciço em zonas onde se planeia que existam as maiores escavações e os vários túneis que existem no traçado. Através da velocidade das ondas sísmicas longitudinais é possível ter uma base para os estados de alteração e fraturação em que os materiais se encontrem.

No caso dos perfis anteriores a 2023 foram realizados em alinhamentos de 60, 90 e 120 metros, de modo a observar em maiores profundidades, respetivamente, 15, 20 e 25 metros. Os 10 perfis da campanha de 2023 foram todos eles realizados com 120 metros de comprimento. Na Tabela 4.5 encontram-se os dados obtidos em todas as campanhas.

Tabela 4.5 Síntese da informação dos perfis sísmicos de refração obtidos durante as várias campanhas de prospeção (IP, 2024a).

Perfil Sísmico	Comprimento	Localização aproximada (km)	VL (m/s)	Prof. médias de ocorrência	Formações Geológicas	Situação
PS201	60	4+012	<900	<7-10	Q	Túnel do Mamodeiro
			900-2000	7-10 a 13	Q/C4	
			>2000-2500	>13	C4	
PS001A-23	120	4+377	<1000	< 5,0-7,0	Q	Túnel do Mamodeiro - Boca de saída
			1000-2300	5,0-7,0 a 13,7-18	Q/C4	
			>2300	> 13,7-18	C4	
PS203	60	10+760	< 900	< 4-11	Q	Escavações
			900-1700	4-11 a > 13	Q/T	
			> 2000-2300	> 13	T	

Perfil Sísmico	Comprimento	Localização aproximada (km)	VL (m/s)	Prof. médias de ocorrência	Formações Geológicas	Situação
PS204	60	11+015	<900	<5-10	Q	Escavações
			900-1500	5-10 a 12-15	Q/T	
			>1500-1700	>12-15	T	
PS105		12+365	<700	<4-10	Q	
			700-1000	4-10 a 8-13	Q/T	
			>100-1400	>8-13	Q/T	
PS002A-23	120	14+499	0 – 600	< 3,7-13,5	Q	
			600 – 900	3,7-13,5 a 18,1-23,0	Q/T	
			> 900	> 18,1-23,0	T	
PS106	60	16+948	<800	<5-7	X	Aterros
			1000-1800	5-7 a 10-13	X	
			>200-2500	>10-13	X	
PS107		17+456	<1000	<5-6	X	
			1000-1600	5-6 a >10	X	
			>1600-2500	>10	X	
PS003A-23	120	21+410	< 2300	< 7,0-10,0	X	Ligação de Canelas
			2300 – 2700	7,0-10,0 a 10,0-15,4	X	
			> 2700	> 10,0-15,4	X	
PS004A-23		22+125	< 2300	< 1,9-9,3	X	
			2300 – 2700	1,9-9,3 a 3,7-10,7	X	
			> 2700	> 3,7-10,7	X	
PS005A-23		22+724	< 2300	< 7,8-12,5	X	
			2300 – 2700	7,8-12,5 a 11,0-15,1	X	
			> 2700	> 11,0-15,1	X	
PS108	60	24+312	<800	<5-12	Q	Escavações
			800-1600	5-12 a 13-15	Q/X	
			>1600	>13-15	X	
PS109		40+549	<800	<5	Xge	
			800-1900	5 a 10-12	Xge	
			>1900-2500	>10-12	Xge	
PS110		41+351	< 900	< 4-7	Q	Aterro
			900-1900	4-7 a 9-11	Q/Xge	
			> 1900-2500	> 9-11	Xge	
PS111		45+434	> 900	< 2-6	Q	Escavações
			900-1900	< 5-9	Q/Xyz	
			> 1900-2500	> 5-9	Xyz	
PS112		46+000	>900	<6-9	Q/Xyz	
			900-2000	6-9 a >11	Xyz	
			>2000	>11	Xyz	
PS301		49+411	<900	<6-7,5	Q	Aterro
			900-2000	6-7,5 a 7,5-11	Q/Xyz	
			>2000	>7,5-11	Xyz	
PS100	120	50+311	<900	<6-8	Q	Escavação
			900-2000	6-8 a 28	Q/Xyz	
			>2000	>28	Xyz	
PS101	60	51+715	<900	<4-6	Q	Túnel do Souto - Boca de saída
			900-2000	4-6 a 6-9	Q/Xyz	
			>2000	>6-9	Xyz	

Perfil Sísmico	Comprimento	Localização aproximada (km)	VL (m/s)	Prof. médias de ocorrência	Formações Geológicas	Situação
PS102	60	53+178	<900	<4-6	Q	Túnel de Cassufas - Boca de entrada
			900-2000	4-6 a 10	Q/Xyz	
			>2000	> 10	Xyz	
PSA1	90	53+733	<400	<5	Xyz	Túnel de Cassufas
			400-1400	20 a 22	Xyz	
			1400-2100	28 a 30	Xyz	
			>2100	>28 a 30	Xyz	
PS103	60	54+248	<900	<6-8	Q/Xyz	Escavação
			900-2000	6-8 a 12-14	Xyz	
			>2000	>12-14	Xyz	
PS006A-23	120	55+203	< 1000	< 6,8-10,9	Xyz	Túnel de Casaldeita - Boca de entrada
1000 – 2000			6,8-10,9 a 14,1-21,1	Xyz		
> 2000			> 14,1-21,1	Xyz		
PS007A-23		56+086	< 1000	< 7,7-11,6	Q	Túnel de Casaldeita
> 1000			> 7,7-11,6	Q/Xyz		
PS008A-23		57+561	< 1000	<3,1-10,8	Xyz	Túnel de Casaldeita - Boca de saída
			1000 a 1500	3,1-10,8 a 9,6-17,8	Xyz	
			> 1500	>9,6-17,8	Xyz	
PS009A-23		59+853	<1000	<4,0-9,3	Q	Túnel de Negrelos - Boca de Entrada
			1000 a 1500	4,0-9,3 a 8,5-16,3	Q/Xyz	
			>1500	>8,5-16,3	Xyz	
PSA7	60	60+888	<400	<2	Q	Túnel de Negrelos
			400-1200	16 a 19	Υπγ/Xyz	
			>1200	>16 a 19	Υπγ/Xyz	
PS010A-23	120	63+340	< 2000	<4,5-23,2	Υπγ	Túnel de Vila Nova de Gaia - Boca de Saída
			> 2000	>4,5-23,2	Υπγ	
PS209	60	5+215 (Ligação de Canelas Descendente)	<900	<5	X	Ligação de Canelas
			900 – 2000	< 5-11	X	
			>2000 - 2500	>5 – 11	X	

Após observação dos perfis sísmicos e dos vários horizontes neles marcados, foram estipulados 3 horizontes sísmicos que correspondem não só a diferentes litologias, como a graus de alteração e fraturação, entre outras características dos materiais. Na Tabela 4.6 encontram-se estes três horizontes bem como as características a que correspondem.

Tabela 4.6 Horizontes Sísmicos principais e as suas características.

Horizontes Sísmicos	Velocidade das ondas sísmicas longitudinais, V_L (m/s)	Formações interessadas	NSPT	Grau de alteração, W (ISMR)	Grau de fracturação, F (SIMR)	Percentagem de recuperação (%)	Percentagem de RQD (%)
HS1	<900	C, Q, X, XYZ, CXG, $\gamma_{\pi g}$ e $\gamma_{\pi m}$	<35	W5	F5	<40%	-
HS2	900-2000	C, XYZ, CXG, $\gamma_{\pi g}$ e $\gamma_{\pi m}$	40-60	W4-5	F4-5	25-60	-
HS3	2000-2500	C, X, XYZ, CXG, $\gamma_{\pi g}$ e $\gamma_{\pi m}$	>60	W4-5 a W3	F4-5 a F3	40-100	Variável (0-80%)

4.3.3.2 Poços de Reconhecimento

Os poços de reconhecimento realizados para a Linha de Alta Velocidade foram feitos apenas entre 2005 e 2009, e com o objetivo de melhor observar as formações geológicas à superfície, bem como de recolher amostras para a realização de ensaios laboratoriais. Como observado na Tabela 4.2, dos 80 poços de reconhecimento realizados apenas 29 se encontram próximos do traçado aprovado no DIA de 2023. Assim, serão referidos as informações referentes apenas a estes 29 poços e aos ensaios que terão sido realizados com amostras a eles pertencentes.

Os poços foram escavados com recurso a uma retroescavadora, chegando a uma profundidade máxima de 4,1 metros. Nestes observou-se a profundidade do nível da água, a espessura da terra vegetal, as litologias e ainda o estado de alteração e fraturação em que os materiais se encontram. Na Tabela 4.7 encontra-se a síntese da informação recolhida para cada poço.

Tabela 4.7 Síntese da informação sobre os poços de reconhecimento próximos ao traçado (IP, 2024a).

Poço	Localização aproximada (km)	Profundidade Atingida (m)	Prof. do nível da água (m)	Espessura da terra vegetal (m)	Formações Geológicas		Alteração/ Fraturação
					Prof.	Litologia	
P201	0+710	3	-	-	0-3,0	C3-4	-
P202	2+922	3	1	1	1,0-3,0	C4	-
P203	4+491	3,5	-	0,5	0,5-3,5	Q	-
P207	11+682	4	-	0,7	0,7-4,0	Q	-
P108	12+665	4	-	0,9	0,9-4,0	Q	-
P109	16+714	2,5	-	0,6	0,6-2,5	X	W4-5
P110	18+945	1,5	-	0,4	0,4-0,8	X	W4-5
					0,8-1,5		W2, F4
P111	21+334	1,5	-	0,3	0,3-1,1	X	W4-5
					1,1 - 1,5		W3 a W4
P112	23+471	3	-	0,4	1,1-3,0	X	W4-5
P113	24+765	3	-	1,1	1,1-3,0	Q	-
P114	26+630	4	-	1,7	1,7-4,0	Q	-
P115	27+960	3	-	1,1	1,1-3,0	Q	-
P119	34+875	2	-	0,7	0,7-2,0	Q	-
P122	39+520	3	-	1,3	1,3-3,0	Q	-
P123	40+508	1,5	-	0,4	0,4-1,5	Xge	W2 a W3, F3
P124	41+264	2	-	1	1,0-2,0	Xge	W4, F3
P125	43+282	3,5	-	0,5	0,5-3,5	Q	-
P126	44+051	3,5	3,3	1,2	1,2-3,5	Xyz	W5
P228	49+233	3,5	-	-	0-1,7	At	-
					1,7-2,8	Q	-
					2,8-3,5	Xyz	W5
P100	49+329	3,7	-	1	1,0 – 3,7	Xyz	W5
P101	49+779	3,1	-	0,8	0,8 – 3,1	Xyz	W5
P102	50+860	2,1	-	0,8	0,8 – 2,1	Xyz	W5
P103	51+976	3,9	-	1,2	1,2 – 3,9	Xyz	W5
P104	52+825	1,4	-	0,7	0,7 – 1,4	Xyz	W5
P200	53+751	3,2	-	0,5	0,5 – 2,2	Xyz	W5
PA1	54+599	2,5	1,8	1,5	1,5 - 2,0	Al	-
					2,0 - 2,5	Xyz	W5
PA2	54+855	1,5	-	0,7	0,7 - 1,5	Xyz	W5
PA4	59+109	3,8	2,6	0,85	0,85 - 3,8	Xyz	W5
PA5	59+809	4,1	2,9	1	1,0 - 4,1	Xyz	W5

4.3.3.3 Sondagens Mecânicas

As sondagens realizadas, tanto para os Estudos Prévios de anos anteriores como para o Estudo Prévio de 2024, tiveram como principais objetivos a caracterização dos materiais em zonas de grandes escavações ou túneis, dado que estes são os mais afetados pelas condições geológicas e geotécnicas. Para além disto, ambicionava-se também determinar que materiais resultantes de escavação poderiam vir a ser reaproveitados e como.

Nas campanhas anteriores foram feitas ao todo 49 sondagens, das quais 16 se encontram próximas da atual solução de traçado. Na campanha de prospeção de 2023 foram realizadas 79 sondagens, das quais 1 encontra-se desviada do traçado dado ter sido feita para o Lote B. Destas, é importante notar, 10 se encontram no local onde se planeia construir a futura estação subterrânea de Santo Ovídio, organizadas em dois alinhamentos de 5 sondagens cada. É nestas sondagens que se planeou realizar os ensaios de tomografia sísmica *cross-hole*. Na Tabela 4.8 encontra-se uma síntese da Informação conseguida com as sondagens realizadas.

Tabela 4.8 Síntese da informação conseguida através das sondagens mecânicas realizadas próximas ao traçado (IP, 2024a).

Sondagem	Comprimento	Situação	Geologia			Prof. atingida (m)
			Prof. (m)	Formação	Alt./Frat.	
S001A-23	0+899	Ponte	0,0-0,2	Tv	-	12,29
			0,2-12,29	C3-4	-	
S201	1+074	Ponte	0,0-3,0	Al	-	16,50
			3,0-16,5	C1-2	-	
S078B-23	1+589	Ponte	0,0-0,3	At	-	13,60
			0,3-15,6	C4	-	
S002A-23	1+826	Ponte	0,0-0,4	At	-	15,12
			0,4-15,12	C4	-	
S080B-23	1+978	Ponte	0,0-0,2	Tv	-	10,62
			0,2-5,7	Q	-	
			5,7-10,62	C4	-	
S003A-23	3+211	Ponte	0,0-0,5	Tv	-	10,58
			0,2-10,58	C4	-	
S004A-23	3+779	Emboquilhamento de túnel	0,0-0,7	At	-	15,00
			0,7-4,3	Q	-	
			4,3-15,0	C4	W4 a W3, F4 a F3	
S202	4+032	Túnel	0,0-4,2	Q	-	18,00
			4,2-18,0	C4	-	
S005A-23	4+209	Emboquilhamento de túnel	0,0-0,7	Tv	-	21,00
			0,7-10,2	Q	-	
			10,2-21,0	C4	W4 a W3, F4 a F3	
S006A-23	8+558	Ponte	0,0-0,9	Tv	-	10,54
			0,9-2,5	Al	-	
			2,5-10,54	T	W5-4	
S007A-23	9+181	Ponte	0,0-0,9	Tv	-	13,86
			0,9-2,6	Al	-	
			2,5-13,86	T	W5-4, F5-4	
S204	9+668	Ponte	0,0-35,2	Al	-	40,50
			35,2-40,5	T	-	
S205	10+236	Ponte	0,0-13,5	T	-	13,50
S206	10+738	Escavação	0,0-0,5	Tv	-	24,00
			0,5-12	Q	-	
			12-24,0	T	-	

Sondagem	Comprimento	Situação	Geologia			Prof. atingida (m)
			Prof. (m)	Formação	Alt./Frat.	
S008A-23	13+818	Escavação	0,0-0,3	Tv	-	18,07
			0,3-12,0	Q	-	
			12,0-18,07	T	-	
S009A-23	14+100	Ponte	0,0-0,9	At	-	10,61
			0,9-4,8	Q	-	
			4,8-10,61	T	-	
S107	14+818	Ponte	0,0-7,2	Q	-	13,50
			7,2-13,5	X	W4-W3, F3	
S010A-23	15+313	Viaduto	0,0-0,4	Tv	-	10,73
			0,4-10,73	X	W5	
S108	15+827	Aterro	0,0-12,0	X	W5-4	12,00
S011A-23	17+204	Viaduto	0,0-1,3	At	-	10,56
			1,3-10,56	X	W5-4	
S012A-23	19+921	Viaduto	0,0-0,2	Tv	-	10,20
			0,2-10,2	X	W4 a W3, F4 a F3	
S013A-23	20+056	Viaduto	0,0-0,6	Tv	-	11,00
			0,6-11,0	X	W3, F4 a F3	
S014A-23	22+048	Viaduto	0,0-0,2	Tv	-	10,50
			0,2-10,5	X	W4 a W3, F4 a F3	
S015A-23	22+365	Viaduto	0,0-0,2	Tv	-	10,00
			0,2-10,0	X	W3, F5-4	
S017A-23	23+328	Ponte	0,0-0,4	Tv	-	10,54
			0,4-10,54	X	W4 a W3, F5-4	
S018A-23	25+428	Ponte	0,0-1,1	At	-	10,50
			1,1-10,5	X	W4 a W3, F5-4	
S019A-23	25+883	Ponte	0,0-0,5	At	-	12,20
			0,5-12,2	X	W5-4, F5	
S020A-23	29+664	Viaduto	0,0-1,0	At	-	12,00
			1,0-12,0	X	W4, F4	
S021A-23	29+922	Viaduto	0,0-0,7	Tv	-	10,50
			0,7-1,3	Q	-	
			1,3-10,5	X	W4 a W3, F5-4	
S022A-23	30+353	Ponte	0,0-0,5	Tv	-	10,50
			0,5-10,5	X	W3, F4	
S023A-23	30+544	Ponte	0,0-0,3	Tv	-	10,50
			0,3-10,5	X	W4 a W3, F5-4	
S024A-23	34+550	Ponte	0,0-1,0	At	-	10,50
			1,0-10,5	X	W3, F4	
S025A-23	38+388	Ponte	0,0-0,3	Tv	-	10,00
			0,3-10,0	X	W3, F4 a F3	
S026A-23	38+525	Ponte	0,0-0,2	Tv	-	10,57
			0,2-10,57	X	W5	
S027A-23	39+967	Ponte	0,0-0,2	Tv	-	10,10
			0,2-10,1	X	W4 a W3, F4	
S028A-23	40+143	Ponte	0,0-0,4	Tv	-	10,30
			0,4-10,3	X	W3, F4 a F3	

Sondagem	Comprimento	Situação	Geologia			Prof. atingida (m)
			Prof. (m)	Formação	Alt./Frat.	
S036A-23	40+593	Ponte	0,0-0,4	Tv	-	12,00
			0,4-12,0	Xge	W4, F5	
S037A-23	40+945	Ponte	0,0-0,2	Tv	-	10,57
			0,2-10,57	Xge	W5	
S038A-23	44+073	Aterro	0,0-0,3	Tv	-	10,50
			0,3-1,3	Al	-	
			1,3-10,5	Xyz	W4 a W3, F4	
S039A-23	44+522	Ponte	0,0-0,7	Tv	-	13,73
			0,7-13,73	Xyz	W5-4	
S040A-23	45+044	Ponte	0,0-0,4	Tv	-	16,58
			0,4-16,58	Xyz	W5	
S109	45+388	Escavação	0,0-1,3	Q	-	23,00
			1,3-23,0	X	W5	
S110	45+987	Escavação	0,0-1,0	Tv	-	22,50
			1,0-6,8	Q	-	
			6,8-22,5	Xyz	W5	
S111	46+379	Viaduto	0,0-1,1	Tv	-	27,00
			1,1-27,0	Xyz	W5	
S041A-23	47+826	Viaduto	0,0-0,4	At	-	24,19
			0,4-24,19	Xyz	W5	
S042A-23	48+882	Viaduto	0,0-1,0	At	-	18,32
			1,0-2,8	Q	-	
			2,8-18,32	Xyz	W5	
S043A-23	49+775	Viaduto	0,0-0,2	Tv	-	10,92
			0,2-10,92	Xyz	W5	
S044A-23	50+328	Escavação	0,0-0,3	Tv	-	10,78
			0,3-5,3	Q	-	
			5,3-10,78	Xyz	W5	
S045A-23	50+850	Ponte	0,0-0,3	Tv	-	10,73
			0,3-10,73	Xyz	W5	
S046A-23	51+546	Emboquilhamento de túnel	0,0-0,4	Tv	-	17,50
			0,4-1,2	Q	-	
			1,2-17,5	Xyz	W5	
S047A-23	51+660	Emboquilhamento de túnel	0,0-0,3	Tv	-	24,33
			0,3-4,1	Q	-	
			4,1-24,33	Xyz	W5	
S048A-23	52+117	Ponte	0,0-0,4	At	-	12,11
			0,4-12,11	Xyz	W5	
S049A-23	52+688	Ponte	0,0-0,1	Tv	-	16,75
			0,1-16,75	Xyz	W5	
S100	53+163	Emboquilhamento de túnel	0,0-1,5	Tv	-	34,00
			1,5-34,0	Xyz	-	
S050A-23	53+701	Túnel	0,0-2,5	At	-	32,00
			2,5-32,0	Xyz	W5	
S101	54+265	Escavação	0,0-2,0	Tv	-	31,00
			2,0-31,0	Xyz	-	
SA1	55+320	Emboquilhamento de túnel	0,0-1,1	Tv	-	22,50
			1,1-22,5	Xyz	W5-4	

Sondagem	Comprimento	Situação	Geologia			Prof. atingida (m)
			Prof. (m)	Formação	Alt./Frat.	
S051A-23	55+353	Emboquilhamento de túnel	0,0-2,7	At	-	19,50
			2,7-19,5	Xyz	W4 a W3, F4 a F3	
S052A-23	56+099	Túnel	0,0-0,6	Tv	-	42,30
			0,6-42,3	Xyz	W4 a W3, F4	
S053A-23	56+687	Túnel	0,0-0,8	Tv	-	42,50
			0,8-42,5	Xyz	W3, F3	
S054A-23	56+437	Emboquilhamento de túnel	0,0-1,3	At	-	16,50
			1,3-16,5	Xyz	W5-4	
S055A-23	59+989	Emboquilhamento de túnel	0,0-0,1	Tv	-	27,40
			0,1-27,4	Xyz	W5	
S056A-23	60+543	Túnel	0,0-1,0	At	-	39,34
			1,0-11,9	Q	-	
			11,9-39,34	Xyz	W5	
SA4	60+886	Túnel	0,0-0,6	Tv	-	23,00
			0,6-7,5	Q	-	
			7,5-12,0	Xyz	W5	
			12,0-23,0	Υπg	W5	
S057A-23	61+614	Túnel	0,0-2,7	At	-	27,10
			2,7-27,1	Υπg	W5	
S058A-23	63+123	Emboquilhamento de túnel	0,0-0,3	Tv	-	45,25
			0,3-45,35	Υπg	W3 a W2, F2	
S060A-23	64+414	Túnel	0,0-0,2	Tv	-	24,25
			0,2-5,3	Al	-	
			5,3-24,25	Υπg	W3, F4	
SA5	64+732	Túnel	0,0-0,9	Tv	-	22,50
			0,9-2,8	At	-	
			2,8-22,5	Υπg	W5	
S061A-23	65+207	Túnel	0,0-4,4	At	-	42,07
			4,4-42,07	Υπg	W5	
S062A-23	65+988	Túnel	0,0-4,35	At	-	52,25
			4,3-27,9	CXG	W5	
			27,9-52,2	Υπg	W3, F4	
S063A-23A	66+455	Estação de Santo Ovídio	0,0-5,6	At	-	69,00
			5,6-14,0	Υm	W5	
			14,0-17,2	CXG	W5	
			17,2-39,4	Υm	W4, F5-4	
			39,4-44,6	CXG	W4 a W3, F5-4	
			44,6-46,6	Υm	W3 a W2, F4 a F3	
			46,6-64,7	CXG	W3 a W2, F4 a F3	
			64,7-69,0	Υm	W3 a W2, F4 a F3	
S063A-23B	66+455	Estação de Santo Ovídio	0,0-5,9	At	-	69,10
			5,9-14,7	Υm	W5	
			14,7-17,8	CXG	W5	
			17,8-26,3	Υm	W4, F5	
			26,3-28,4	CXG	W4, F5-4	
			28,4-29,5	Υm	W4 a W3, F4	
			29,5-31,85	CXG	W4, F5-4	
			31,85-34,0	Υm	W3, F5-4	
			34,0-49,35	CXG	W3 a W2, F4 a F3	
			49,35-57	Υm	W3 a W2, F4 a F3	
			57-64,85	CXG	W3 a W2, F3	
			64,85-69,1	Υm	W3 a W2, F3 a F2	

Sondagem	Comprimento	Situação	Geologia			Prof. atingida (m)
			Prof. (m)	Formação	Alt./Frat.	
S064A-23A	66+487	Estação de Santo Ovídio	0,0-6,9	At	-	64,54
			6,9-54,1	Ym	W5	
			54,1-64,54	CXG	W5	
S064A-23B	66+487	Estação de Santo Ovídio	0,0-10	At	-	64,50
			10-49,2	Ym	W5	
			49,2-51,9	CXG	W5-4, F5-4	
			51,9-64,54	Ym	W3 a W2, F4 a F3	
S065A-23A	66+578	Estação de Santo Ovídio	0-11,5	At	-	60,70
			11,5-23,1	Ym	W5	
			23,1-23,9	CXG	W5	
			23,9-60,7	Ym	W3, F4	
S065A-23B	66+578	Estação de Santo Ovídio	0-11,5	At	-	61,03
			11,5-15,4	Al	-	
			15,4-61,03	Ym	W5	
S066A-23A	66+659	Estação de Santo Ovídio	0-9,0	At	-	57,00
			9,0-53,1	Ym	W4 a W3, F5-4	
			53,1-54	CXG	W5-4, F5	
			54-57	Ym	W4 a W3, F5-4	
S066A-23B	66+659	Estação de Santo Ovídio	0,0-8,8	At	-	57,00
			8,8-57	Ym	W3, F4	
S067A-23A	66+732	Estação de Santo Ovídio	0,0-2,9	At	-	53,20
			2,9-53,2	Ym	W3 a W2, F4 a F3	
S067A-23B	66+732	Estação de Santo Ovídio	0,0-4,1	At	-	53,55
			4,1-53,55	Ym	W3, F4	
S076A-23	67+585	Túnel	0,0-0,2	Tv	-	26,00
			0,2-9,0	Ym	W5-4, F5-4	
			9,0-12,1	CXG	W5	
			12,1-21	Ym	W5-4, F5-4	
			21-26	CXG	W4, F5-4	
S077A-23	67+974	Emboquilhamento de túnel	0,0-0,5	Tv	-	26,00
			0,5-18,7	Ym	W3 a W2, F4 a F3	
S078A-23	69+551	Viaduto	0,0-2,6	At	-	30,00
			2,6-30	Ym	W4, F4 a F3	
S079A-23	69+916	Viaduto	0,0-9,4	At	-	21,10
			9,4-21,1	Ym	W3 a W2, F3	
S080A-23	70+251	Viaduto	0,0-1,4	At	-	25,15
			1,4-25,15	Ym	W3 a W2, F4 a F3	
S068A-23	0+490 (Lig. Canelas Asc.)	Viaduto	0,0-0,8	At	-	30,60
			0,8-26,7	Al	-	
			26,7-30,6	X	W5-4, F5	
S069A-23	0+972 (Lig. Canelas Asc.)	Viaduto	0,0-0,8	Tv	-	22,56
			0,8-17,5	Al	-	
			17,5-30,6	X	W5-4, F5	
S070A-23	1+510 (Lig. Canelas Asc.)	Viaduto	0,0-0,7	Tv	-	16,50
			0,7-9,0	Al	-	
			9,0-16,5	X	W4, F5-4	
S071A-23	2+627 (Lig. Canelas Asc.)	Viaduto	0,0-0,1	Tv	-	12,07
			0,1-12,07	X	W5	

Sondagem	Comprimento	Situação	Geologia			Prof. atingida (m)
			Prof. (m)	Formação	Alt./Frat.	
S072A-23	3+706 (Lig. Canelas Asc.)	Viaduto	0,0-0,2	Tv	-	10,50
			0,2-10,5	X	W4 a W3, F4 a F3	
S073A-23	4+430 (Lig. Canelas Desc.)	Viaduto	0,0-0,2	Tv	-	10,50
			0,2-12,07	X	W3, F4	
S211	5+216 (Lig. Canelas Desc.)	Aterro	0,0-0,5	Tv	-	18,00
			0,5-18,0	X	W3, F4 a F3	
S074A-23	5+795 (Lig. Canelas Desc.)	Viaduto	0,0-0,6	At	-	10,50
			0,6-10,5	X	W4 a W3, F5-4	
S075A-23	6+1334 (Lig. Canelas Desc.)	Viaduto	0,0-0,1	At	-	10,50
			0,1-10,5	X	W3, F5-4	

De acordo com o Subcapítulo 4.2 Enquadramento Geológico, seria expectável encontrar cerca de 13 unidades litológicas diferentes, porém, devido à organização da campanha de prospeção foram intercetadas em sondagem apenas 9, ficando por intercetar algumas das formações do Cretácico. Na Tabela 4.9 encontra-se informação quanto aos comprimentos de material que foram intercetados em sondagem. Há que notar, porém, que estes números não representam a quantidade de material que poderá existir em terreno, apenas aquela que foi intercetada em sondagem.

Tabela 4.9 Comprimento total de cada material.

Símbolo	Descrição	Comprimento total (m)	%
At	Aterro	122,20	5,61
Tv	Terra vegetal	24,60	1,13
Al	Aluviões	109,90	5,05
Q	Depósitos do Quaternário	91,70	4,21
C4	Grés de Verba/Arenitos Mamodeiro	71,52	3,28
C3-4	Grés de Oíã	0,00	0,00
C3	Grés de Furadouro	0,00	0,00
C2	Calcários de Mamarrosa	0,00	0,00
C1-2	Grés de Palhaça	18,09	0,83
T	Arenitos de Eirol	71,08	3,26
X	Unidade de Arada	285,69	13,12
Xge	Unidade de Espinho	21,97	1,01
Xyz	Unidade de Lourosa	521,08	23,93
CXG	Complexo Xisto-Grauváquico	103,79	4,77
Yπg	Granito da Madalena	156,67	7,19
Yπm	Granito do Porto	579,43	26,61
	Total	2177,72	100,00

Como referido acima, não foram intercetados materiais pertencentes às formações dos Grés de Oíã, Grés do Furadouro e Calcários de Mamarrosa. Esta situação pode estar relacionada com o facto de que estes materiais ocorrem apenas na zona inicial do traçado, ou até mesmo ligeiramente antes do mesmo.

4.3.3.4 Ensaios SPT

Durante a furação das sondagens foram realizados ensaios de SPT, de forma a caracterizar os solos e materiais terrosos a rochosos brandos que a sondagem pudesse intercepar. São especialmente importantes para a caracterização da compacidade de formações arenosas e a consistência de formações argilosas, de modo a determinar se são materiais adequados para os usos que lhes sejam dados durante a obra, nomeadamente no caso de se encontrarem nas fundações de viadutos e pontes, e determinar se os materiais resultantes das grandes escavações e túneis poderão vir a ter um reaproveitamento em aterros.

Foram realizados, ao todo, 1000 ensaios de SPT, 204 nas campanhas de prospeção anteriores e 796 na campanha de prospeção de 2023. Na Tabela 4.10 observa-se a tabela criada com os dados obtidos nos ensaios SPT, relacionando os valores de SPT com a unidade litológica.

Tabela 4.10 Valores de SPT registados para cada uma das Unidades Litoestratigráficas que interceam o traçado.

Unidade Litográfica / Intervalos de SPT	0-4	4-10	10-30	30-50	50-60	Nega na 1ª fase	Total
At	13	14	29	2	1	0	59
Tv	0	0	1	1	0	0	2
Al	31	14	8	5	7	1	66
Q	2	3	30	16	8	0	59
C4	1	3	6	4	12	11	37
C3-4	1	2	4	1	9	0	17
C3	0	0	0	0	0	0	0
C2	0	0	0	0	0	0	0
C1-2	0	0	0	0	0	0	0
T	4	0	1	0	14	31	50
X	0	0	5	10	60	31	106
Xge	0	0	1	2	6	3	12
Xyz	0	16	73	56	102	23	270
CXG	0	1	2	5	11	12	31
Yπg	0	4	19	19	21	16	79
Yπm	0	2	18	17	45	130	212
Total	52	59	197	138	296	258	1000

4.3.3.5 PDL

Como visto na Tabela 4.2 acima, foram realizados ensaios de PDL apenas nas campanhas de prospeção anteriores, e embora ao todo tenham sido feitos 21, apenas 6 se encontram próximos do traçado aprovado pelo DIA. Estes ensaios foram nomeadamente realizados em locais de fundação para aterro, possibilitando uma análise da espessura e das características de resistência à penetração dos materiais presentes na própria fundação.

Devido a maior facilidade na realização do ensaio, tornaram-se de extrema importância na caracterização de materiais em zonas de difícil acesso.

Na Tabela 4.11 encontra-se a informação compilada dos 6 ensaios PDL, entre as quais se encontram a localização do ensaio, a profundidade e formações geológicas que o mesmo atingiu e a Resistência Dinâmica.

Tabela 4.11 Informação compilada dos PDL's próximos ao traçado aprovado pelo DIA (IP, 2024a)

PDL	Localização aproximada (km)	Prof. Atingida (m)	Formação Geológica	Resistência Dinâmica	
				Prof. (m)	Qd (Mpa)
PDL 201	2+958	4,03	Al + C4	0–2,7	<1
				2,7–3,7	1–5
				3,7–4,0	10–>35
PDL 104	13+500	2,99	Al + T	0–1,9	<1
				1,9–2,6	10–32
				2,6–3,0	32–>54
PDL 105	20+800	1,61	X	0–0,8	<1
				0,8–1,3	0–10
				1,3–1,6	20–>68
PDL 106	30+512	2,21	Al + X	0–1,9	<1
				1,9–2,2	20–>60
PDL 109	39+785	0,89	Q	0–0,4	<10
				0,4–0,8	10–>70
PDL 110	44+106	3,75	Al + Xyz	0–0,9	<1
				0,9–3,4	8–28
				3,4–3,7	10–>54

4.3.3.6 DPSH

Antes de 2023 foram realizados próximos das diversas soluções de traçado, ao todo 49 ensaios, dos quais 25 serão abordados neste estudo devido à sua proximidade com o traçado da DIA. Quanto aos dados obtidos durante a prospeção de 2023, foram realizados 32 ensaios, porém, como foi visto no caso das sondagens alguns destes ensaios encontram-se afastados do traçado, dado terem sido realizados na Interligação de Ovar, a qual não se encontra no traçado do DIA, e, portanto estes DPSH, devido à sua distância não serão considerados. Assim, ao todo, foram realizados

Estes ensaios foram realizados nomeadamente junto a Obras de Arte Especiais (OAE), em zonas de aluvião de modo a determinar a resistência e deformabilidade dos materiais em locais de fundação de aterro, pontes e viadutos.

Na Tabela 4.12 encontra-se uma síntese das informações obtidas através dos ensaios DPSH de todas as campanhas de prospeção entre 2005 e 2024.

Tabela 4.12 Síntese dos dados obtidos com os ensaios DPSH realizados nas campanhas de prospeção (IP, 2024a).

Poço	Localização aproximada (km)	Prof. Atingida (m)	Formações Geológicas	Resistência Dinâmica Alteração	
				Prof.	Qd (Mpa)
DPSH201	1+363	31,36	Al+C3-4	0–19,0	<10
				19,0–30,6	10-16
				30,6–31,2	18->28
DPSH202	2+187	11,11	C4	0–8,0	<10
				8,0–10,4	17-37
				10,4–11,0	48-53
DPSH001A-23	2+500	10,4	At(?) + Al	0,0-1,0	7,04-29,18
				1,0-1,8	1,80-7,04
				1,8-6,4	0,68-2,89
				6,4-7,8	1,95-5,85
				7,8-10,4	5,56-56,39
DPSH002A-23	3,387	2,4	C4	0,0-1,8	3,02-34,52
				1,8-2,4	52,18-86,97
DPSH003A-23	5+452	8,8	Q	0,0-1,4	2,01-7,46
				1,0-4,4	13,06-46,96
				4,4-7,8	10,72-28,73
				7,8-8,8	24,68-61,82
DPSH004A-23	6+500	11,6	Q	0,0-1,0	5,03-20,12
				1,0-3,4	5,22-8,40
				3,4-10,4	7,79-18,28
				10,4-11,6	21,99-54,01
DPSH203	8+913	31,54	Al+T	0–31,0	<10
				31,0–31,6	23->27

Poço	Localização aproximada (km)	Prof. Atingida (m)	Formações Geológicas	Resistência Dinâmica Alteração	
				Prof.	Qd (Mpa)
DPSH005A-23	9+334	18,8	Al	0,0-0,8	3,02-16,10
				0,8-4,8	3,73-6,09
				4,8-5,6	0,00-1,45
				5,6-13,4	1,30-5,06
				13,4-14,6	4,48-5,75
				14,6-15,8	2,77-3,84
				15,8-18,0	8,03-10,35
				18,0-18,8	16,27-41,72
DPSH204	9+939	18,28	Al	0-16,0	<10
				16,0-17,8	10-22
				17,8-18,2	40-44
DPSH007A-23	11+325	2,4	T	0,0-0,8	6,04-28,17
				0,8-1,4	10,26-12,07
				1,4-2,4	16,79-86,97
DPSH008A-23	12+952	8,2	Al(?) + T	0,0-6,0	3,02-8,67
				6,0-8,2	15,05-61,82
DPSH105	14+046	5,71	Al + T	0-1,8	<5
				1,8-5,2	15-50
				5,2-5,6	79->69
DPSH106	14+938	3,72	Al + X	0-2,2	<10
				2,2-2,8	16-27
				2,8-3,6	41->78
DPSH009A-23	15+166	3	X	0,0-2,4	2,01-22,39
				2,4-3,0	26,96-86,97
DPSH107	15+460	4,88	Q + X	0-4,0	<10
				4,0-4,8	39->73
DPSH010A-23	15+647	2,8	Q + X	0,0-1,6	9,05-48,29
				1,6-2,2	9,33-13,91
				2,2-2,8	32,18-86,97
DPSH108	20+000	2,04	Al + X	0-1,2	<10
				1,2-2,0	62->90
DPSH109	21+580	1,48	Al + X	0-0,6	<14
				0,6-1,2	38->97
DPSH013A-23	22+429	1,8	Al + X	0,0-0,6	1,01-12,07
				0,6-1,8	26,16-93,29
DPSH110	22+500	2,52	Al + X	0-0,8	>5
				0,8-2,0	13-22
				2,0-2,4	64->84
DPSH111	23+195	2,28	Al + X	0-1,6	<12
				1,6-2,2	75-108
DPSH112	25+618	7,42	Al + X	0-6,2	<10
				6,2-6,8	12-13
				6,8-7,4	56-69
DPSH014A-23	28+778	5,2	Q	0,0-1,4	2,01-10,06
				1,4-2,2	12,18-23,32
				2,2-4,2	26,09-55,38
				4,2-4,8	9,19-21,44
				4,8-5,2	30,63-72,27

Poço	Localização aproximada (km)	Prof. Atingida (m)	Formações Geológicas	Resistência Dinâmica Alteração	
				Prof.	Qd (Mpa)
DPSH113	29+766	5,72	Q+X	0–1,6	<10
				1,6–3,8	10–17
				3,8–4,6	28–36
				4,8–5,6	54–>69
DPSH015A-23	32+000	1,4	Q+X	0,0-1,0	3,02-15,09
				1,0-1,4	46,65-93,29
DPSH016A-23	33+359	2,8	Q+X	0,0-2,0	2,01-13,06
				2,0-2,6	12,18
				2,6-2,8	86,97
DPSH017A-23	34+405	1,6	X	0,0-0,4	2,01-17,1
				0,4-1,2	38,25-41,25
				1,2-1,6	68,10-93,29
DPSH114	34+485	1,73	Al+X	0–0,2	<10
				0,2–1,0	10–23
				1,0–1,7	72->90
DPSH116	40+071	2,62	Al+X	0–2,2	<5
				2,2–2,6	68->83
DPSH117	40+836	3,54	Al+Xge	0–2,2	<10
				2,2–2,8	20–23
				2,8-3,0	49->78
DPSH118	44+783	10,3	Al+Xyz	0–6,2	<10
				6,2–8,4	12–34
				8,4–9,8	5–16
				9,8–10,2	46->50
DPSH022A-23	46+857	4,6	Xyz	0,0-2,4	3,02-16,10
				2,4-3,4	12,18-21,18
				3,4-4,6	35,84-76,58
DPSH023A-23	47+166	1,4	Xyz	0,0-0,6	2,01-12,07
				0,6-1,0	19,12-21,13
				1,0-1,4	30,79-93,29
DPSH024A-23	47+520	15,6	Q	0,0-1,2	1,01-9,33
				1,2-2,6	12,13-18,66
				2,6-12,2	4,79-10,62
				12,2-15,0	8,97-17,62
				15,0-15,6	15,35-46,23
DPSH025A-23	48+624	13,2	Q	0,0-6,0	2,01-12,22
				6,0-7,0	6,84-10,95
				7,0-9,4	12,99-22,26
				9,4-12,6	14,10-28,51
				12,6-13,2	35,24-49,82
DPSH100	49+000	3,45	Al+Xyz	0-0,6	2–3
				0,6-1,6	9–10
				1,6-3,2	13–18
				3,2-3,45	40–51
DPSH214	49+664	15,72	Al+Xyz	0–12,0	<10
				12,0–15,2	8–21
				15,2–15,6	30->44

Poço	Localização aproximada (km)	Prof. Atingida (m)	Formações Geológicas	Resistência Dinâmica Alteração	
				Prof.	Qd (Mpa)
DPSH026A-23	51+172	0,2	Al+Xyz	0,0-0,8	2,01-18,11
				0,8-2,0	3,73-7,04
				2,0-2,6	10,44-13,91
				2,6-8,8	0,00-7,42
				8,8-9,2	34,00-58,98
DPSH027A-23	51+393	2,6	Xyz	0,0-2,0	3,02-26,16
				2,0-2,6	29,57-86,97
DPSH103	52+257	6,55	Xyz	0-1,0	2-4
				1,0-3,2	6-12
				3,2-4,2	12-17
				4,2-5,2	25-37
				5,2-6,0	8-21
DPSHA1	54+557	12	Al+Xyz	6,0-6,55	26-42
				0-3,8	0,8-2,9
				3,8-4,6	4,1-7,5
				4,6-10,0	7,5-30,9
DPSH201	57+635	8,6	Al+Xyz	10,0-12,0	20,5-82,1
				0-3,6	3-10
DPSHA2	57+821	2,8	Xyz	3,6-8,6	10->38
				0-1,4	0,9-6,6
DPSH028A-23	58+007	2,6	Xyz	1,4-2,8	28,7-76,9
				0,0-2,4	2,01-26,16
DPSH202	58+202	5,8	Al+Xyz	2,4-2,6	86,97
				0-5,4	1-13
DPSHA3	59+058	7,6	Al+Xyz	5,4-5,8	13->45
				0-2,0	0,8-8,2
				2,0-3,8	10,9-16,1
				3,8-4,6	2,7-6,8
				4,6-7,2	12,3-35,1
DPSH029A-23	2+047 (Lig. de Canelas Asc.)	4,4	Al+C2(?)	7,2-7,6	42,8-58,6
				0,0-1,8	1,01-8,05
				1,8-4,0	0,81-2,44
DPSH030A-23	2+265 (Lig. de Canelas Asc.)	8,4	Al+X(?)	4,0-4,4	19,91-76,58
				0,0-0,6	2,01-21,13
				0,6-6,4	1,45-8,21
				6,4-7,0	15,74-38,31
				7,0-7,8	10,39-15,59
DPSH032A-23	4+182 (Lig. de Canelas Asc.)	2,2	X	7,8-8,4	31,18-61,82
				0,0-0,8	6,04-46,28
				0,8-1,6	22,39-28,17
DPSH033A-23	4+946(Lig. de Canelas Desc.)	1	X	1,6-2,2	37,32-86,97
				0,0-0,6	3,02-8,05
DPSH034A-23	5+329(Lig. de Canelas Desc.)	1,6	X	0,6-1,0	60,37-100,61
				0,0-1,0	4,02-24,15
DPSH035A-23	5+641(Lig. de Canelas Asc.)	2,2	X	1,0-1,6	54,11-93,29
				0,0-1,0	2,01-21,13
DPSH036A-23	5+897(Lig. de Canelas Asc.)	1,2	X	1,0-2,2	35,45-86,97
				0,0-0,6	2,01-6,04
				0,6-1,2	22,13-93,29

4.3.3.7 Ensaios Laboratoriais

Como visto anteriormente, para além dos trabalhos realizados *in situ* também foram feitas testes laboratoriais, nas campanhas anteriores foram realizadas análises ao solo e na campanha de 2023 foi optado por realizar testes à Compressão Uniaxial.

4.3.3.7.1 Ensaios de Identificação e Caracterização dos Solos

Foram realizados dois tipos de testes de forma a identificar o tipo de solo e também a caracterizar o próprio solo, com o objetivo de determinar o comportamento dos materiais terrosos que podem vir a ser reaproveitados em aterros. No que toca aos primeiros referidos, foram realizadas análises granulométricas por peneiração, determinação dos limites de Atterberg, equivalente de areia e ensaio de azul de metileno.

O resultados obtidos com estes ensaios encontram-se na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 Resultados dos ensaios de identificação realizados a materiais terrosos (IP, 2024a).

Amostra	Prof. da Amostra	Litologia	Granulometria (% passada)			D _{MAX} (mm)	Limites de Atterberg (%)		EA (%)	VAM
			#10	#40	#200		LL	IP		
P201	1,4-3,0	C3-4	77	52	8	4,76-9,51	NR	NP	27	1,24
P202	1,0-3,0	Al	93	64	36	9,51-19,0	27	10	15	3,3
P203/1	0,5-2,4	Q	98	80	39	9,51-19,0	22	8	11	0,6
P203/2	2,4-3,5	Q	91	46	18	9,51-19,0	25	8	23	1,22
P207/1	0,7-3,0	Q	93	75	51	19,0-25,4	26	8	8	0,55
P207/2	3,0-4,0	Q	56	16	8	19,0-25,4	NR	NP	32	0,65
P108/1	0,9-1,4	Q	91	85	76	19,0-25,4	44	20	4	1,52
P108/2	1,4-4,0	Q	46	19	11	38,1-50,8	35	NP	24	0,67
P109	0,6-2,5	X	55	44	38	38,1-50,8	46	17	9	0,6
P110	0,4-1,5	X	10	7	5	>76,1	NR	NP	18	-
P111	0,3-1,5	X	34	23	18	50,8-76,1	42	NP	17	-
P112	1,1-3,0	X	59	47	36	25,4-38,1	51	19	3	-
P113	1,1-3,0	Q	89	64	26	38,1-50,8	25	12	15	0,9
P114/1	1,7-2,5	Q	100	98	88	0,84-2,0	41	18	1	-
P114/2	2,5-4,0	Q	100	54	20	2,0-4,76	22	NP	23	-
P115	1,1-3,0	Q	93	54	24	4,76-9,51	42	18	16	-
P119	0,7-2,0	Q	70	47	22	>76,1	38	19	19	1,3
P124	1,0-2,0	Xge	47	32	13	>76,1	NR	NP	14	1
P228/1	1,7-2,8	Q	53	36	24	38,1-50,8	26	7	18	0,2
P228/2	2,8-3,5	Xyz	92	64	47	25,4-38,1	42	16	3	1,4
P100	1,0-3,7	Xyz	87	57	28	25,4-38,1	NR	NP	21	0,23

Amostra	Prof. da Amostra	Litologia	Granulometria (% passada)			D _{MAX} (mm)	Limites de Atterberg (%)		EA (%)	VAM
			#10	#40	#200		LL	IP		
P101	0,8-3,1	XYZ	79	46	32	4,76-9,51	NR	NP	18	0,32
P103	1,2-3,9	XYZ	58	38	22	38,1-50,8	33	10	18	0,44
P200	0,5-2,2	XYZ	85	52	21	9,51-19,0	NR	NP	25	0,34
PA1	1,5-2,0	AI	59	28	10	38,1-50,8	NR	NP	25	0,15
PA2	0,7-1,5	XYZ	87	25	7	4,76-9,51	NR	NP	38	0,09
PA4	0,85-3,8	XYZ	82	59	37	25,4-38,1	NR	NP	16	0,34
PA5	1,0-4,1	XYZ	98	61	34	4,76-9,51	35	9	23	0,34

Quanto aos ensaios de caracterização foram realizados três tipos, a determinação do teor de água natural, Proctor modificado e ensaios CBR. Os ensaios Proctor modificado foram realizados em amostras remexidas, enquanto os ensaios CBR foram realizados nas amostras compactadas.

Na Tabela 4.14 encontra-se a síntese dos resultados obtidos com os três ensaios.

Tabela 4.14 Síntese dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização realizados aos materiais terrosos (IP, 2024a).

Amostra	Litologia	Teor de Água Natural (%)	Proctor Modificado		CBR			
			Y _{dmax} (g/cm ³)	W _{sat} (%)	CR (%)	Desvio W _{sat} (%)	EXP (%)	Índice CBR (%)
P201	C3	3,4	-	-	-	-	-	-
P202	AI	18,7	-	-	-	-	-	-
P203/1	Q	13,0	-	-	-	-	-	-
P203/2	Q	8,2	2,11	7,9	90	-0,5	0	10
					95	-0,9	0	30
					99	-0,5	0	77
					CBR _{95%} = 41%			
P207/1	Q	16,4	2,07	9,9	87	+0,3	3	4
					92	-0,1	4	10
					97	-0,1	3	42
					CBR _{95%} = 26%			
P207/2	Q	11,3	2,09	9,2	89	-0,9	0	13
					96	-1,0	0	32
					99	-1,1	0	82
					CBR _{95%} = 29%			
P108/1	Q	15,0	-	-	-	-	-	-
P108/2	Q	8,2	2,12	7,9	90	0	0	10
					94	-0,4	0	31
					99	-0,2	0	66
					CBR _{95%} = 40%			
P109	X	12,8	1,74	17,5	91	-0,1	4	2
					98	-0,2	5	3
					100	0	6	4
					CBR _{95%} = 3%			
P110	X	4,4	-	-	-	-	-	-
P111	X	15,5	-	-	-	-	-	-

Amostra	Litologia	Teor de Água Natural (%)	Proctor Modificado		CBR			
			Y _{dmax} (g/cm ³)	W _{sat} (%)	CR (%)	Desvio W _{sat} (%)	EXP (%)	Índice CBR (%)
P112	X	24,6	-	-	-	-	-	-
P113	Q	8,7	2,05	9,1	91	+0,7	0	8
					97	+1,1	0	20
					98	+1,1	0	28
					CBR _{95%} = 18%			
P114/1	Q	19,3	-	-	-	-	-	-
P114/2	Q	9,5	-	-	-	-	-	-
P115	Q	12,8	-	-	-	-	-	-
P119	Q	8,0	1,93	13,5	91	+0,4	0	11
					97	0	0	23
					98	-0,1	0	25
					CBR _{95%} = 18%			
P122	Q	9,1	-	-	-	-	-	-
P123	Xge	8,8	-	-	-	-	-	-
P124	Xge	6,8	1,99	11,8	88	+0,4	1	6
					93	-0,5	1	13
					99	0	1	35
					CBR _{95%} = 22%			
P125	Q	25,5	-	-	-	-	-	-
P126	Xyz	24,2	-	-	-	-	-	-
P228/2	Xyz	15,8	1,86	14,7	-	-	-	-
P100	Xyz	11,1	-	-	-	-	-	-
P101	Xyz	7,8	1,92	11,4	99	+0,3	0,6	5
					CBR _{95%} = 4%			
P103	Xyz	12,3	-	-	-	-	-	-
P200	Xyz	8,1	1,78	13,9	100	-0,7	0,5	27
					CBR _{95%} = 27%			

4.3.3.7.2 Ensaios de Compressão Uniaxial

Estes ensaios, ao contrário dos anteriores não procuram caracterizar os materiais terrosos, mas o maciço rochoso, nomeadamente nas zonas dos túneis previstos, de modo a identificar quais as melhores abordagens no que toca à escavação e aos suportes a colocar.

A amostragem foi feita tendo em conta as sondagens localizadas nos túneis, nomeadamente os túneis do Mamodeiro, Casaldeita e Vila Nova de Gaia, bem como a futura estação de Santo Ovídio. Assim, na Tabela 4.15 estão os dados obtidos com os 15 ensaios realizados.

Tabela 4.15 Resultado dos Ensaios de Compressão Uniaxial realizados (IP, 2024b).

Amostra	Prof. da Amostra	Litologia	Estado de Alteração	Teor em água (%)	Peso Volúmico Seco (kN/m³)	Tensão de Rotura (Mpa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
S004A-23	7,87-8,10	C4	W4/3	5,1	20,9	2,8	-
S005A-23	12,66-13,08	C4	W4/3	7,2	22,4	3,8	0,6
S051A-23	13,80-14,40	Xyz	W3/2	0,5	26,5	23,1	3,8
S052A-23	33,00-33,32	Xyz	W3	Ensaio não realizado - Provete fraturado			
S053A-23	31,65-32,10	Xyz	W3/2	0,8	25,9	12,3	2,2
S054A-23	10,50-10,78	Xyz	W3/2	1,5	25,3	12,1	2,5
S062A-23	46,13-46,50	ym	W4/3	0,8	25,2	18,4	4,3
S063A-23A	51,60-51,86	CXG	W3/2	0,3	27,5	31,1	6,3
S064A-23B	55,80-55,96	ym	W3/2	0,4	26,0	19,9	6,0
S065A-23A	42,05-42,48	ym	W3	1,5	24,2	15,8	1,2
S066A-23B	47,10-47,42	ym	W3	0,3	23,6	6,5	1,2
S067A-23A	34,40-34,80	ym	W4/3	2,4	22,5	2,7	0,7
S077A-23	9,00-9,22	ym	W3/2	3,3	23,1	5,5	-
S078A-23	18,24-18,61	ym	W4/3	6,2	20,7	2,7	0,3
S079A-23	13,56-14,21	ym	W3/2	0,6	25,6	54,7	10,0

4.4 Interpretação dos Resultados Obtidos

No subcapítulo anterior encontram-se os dados obtidos com as campanhas de prospeção realizadas ao longo dos anos para o Lote A da Linha de Alta Velocidade, neste capítulo será feita, inicialmente focada em cada um dos Trechos mencionados no Subcapítulo 4.1. A abordagem à Ligação de Canelas à Linha do Norte, embora esta faça parte do Trecho 1, será feita separadamente.

4.4.1 Trecho 1

O primeiro trecho do traçado é também o maior, estendendo-se desde os 00,000 ao km 31,490 do traçado, albergando as Soluções B1, ILBA de São João de Loure, A2, A3 e ILAB de Loureiro. Este trecho engloba ainda um túnel – Túnel do Mamodeiro -, sete pontes, duas das quais com dois quilómetros ou mais de extensão, e cinco viadutos, para além de aterros e escavações ao longo do traçado.

A Linha de Alta Velocidade neste trecho irá intercalar variadas formações geológicas, entre as quais as unidades de idade Cretácica, Triásica e ainda a Unidade de Arada de idade Pré-Câmbrica, bem como sistemas aquíferos, dos quais se salientam os Sistemas Aquíferos de Aveiro, e ainda o Vale Aluvionar do Rio Vouga. É ainda importante notar que este trecho atravessa, na maioria da sua extensão, zonas agrícolas e industriais, com poucas zonas urbanas.

Aterro

Os aterros neste trecho apresentam-se pouco profundos, com não mais que 1,5 metros de espessura. São compostos de materiais areno-siltosos, muitas vezes com seixos ou contaminação orgânica. Dado não atingirem mais que 1,5 metros de espessura, não foi possível realizar ensaios de SPT para determinar a sua compacidade.

Aluvião

Os depósitos aluvionares nesta zona do traçado diferem um pouco dependendo de onde se localizam:

- No vale aluvionar do rio Vouga, estes atingem uma profundidade de mais de 30 metros, apresentando seixos rolados no meio do material arenoso, bem como lodos e argilas, mostrando uma coloração escura;

- No vale de Rio Maior, embora apresentem uma profundidade maior que 10 metros, as areias não são lodosas, podendo porém apresentar uma componente mais siltosa;
- Em linhas de água de menor ordem, o aluvião não excede os 3 metros de espessura, tratando-se de areias finas siltosas.

Numa generalidade o N_{SPT} destes materiais não excede o valor de 15, excetuando quando já se encontra a profundidades elevadas, tratando-se assim de materiais de compacidade solta a média. Os ensaios de DPSH e PDL apoiam esta conclusão, dado apresentarem também eles valores de resistência baixos quando em contacto com materiais aluvionares. Não foram recolhidas, neste trecho, amostras de aluvião para realizar testes laboratoriais.

Depósitos do Quaternário

Este material é descrito de uma forma uniforme por todo o trecho, como se tratando de um solo areno-siltoso, de grão fino a médio e castanho. Tal como nos aluviões, embora apresente valores de N_{SPT} altos a maiores profundidades ou em determinados locais, a média encontra-se nos 27, classificando este solo como solto a medianamente compacto. Os ensaios laboratoriais, dos quais se encontram gráficos nas figuras realizados com este material permitiram classificá-lo como na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 Classificação dos Depósitos do Quaternário tendo em conta os resultados dos ensaios laboratoriais nelas realizados.

Formação Geológica	Classificações		
	ASTM	AASHTOO	SETRA-GTR
Q	SC, SM, CL Areia argilo-siltosa; argila leve	A2-4, A7-6 Areia siltosa	A1, B2, B5 Areia argilo-siltosa, síltes pouco plásticos

Cretácico

Os primeiros materiais intercetados pelo traçado tratam-se das rochas sedimentares do Cretácico, das quais apenas três – Grés de Palhaça, Grés de Oia e Arenitos do Mamodeiro – foram identificadas em sondagem. Foram realizadas 9 sondagens ao todo nestas litologias, atingindo profundidades entre 10,58 e 21 metros. Estas permitem descrever as litologias encontradas.

O Grés de Palhaça foi descrito como um material argilo siltoso de tons acinzentados, mais siltoso na base e com passagens arenosas e seixos de quartzo. As

argilas apresentam valores de N_{SPT} entre 2 e 60, porém com uma maioria dos valores acima de 20 elas poderão ser classificadas como tendo uma consistência rija, os siltes apresentam valores de N_{SPT} de 60, classificando-os como muito compactos.

O Grés de Oiã trata-se de um material descrito como uma areia siltosa de granulometria fina a média, de coloração castanha alaranjada a amarelada, apresentando seixo de calibre fino em profundidade. O seu N_{SPT} varia entre 7 e 60, porém a maioria dos valores fica acima dos 30, o que a classifica como uma areia compacta a muito compacta. Os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais realizados com uma amostra desta formação permitiram classificá-la como mostra na Tabela 4.17.

Os Arenitos do Mamodeiro são descritos em várias sondagens como uma areia siltosa de grão fino a médio com seixo disperso, com uma coloração castanha a cinzenta. Em algumas sondagens intercetou-se rocha, na sua maioria num estado medianamente alterado ou muito alterado, identificada como grés de grão fino a médio e coloração acinzentada. Os valores de N_{SPT} , embora variem entre 4 e mais que 60, dão uma média de 47, com vários dos ensaios a dar nega na primeira fase, podendo classificar-se este material como muito compacto. As classificações feitas com os resultados dos testes laboratoriais encontram-se na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 Classificação das formações Cretácicas tendo em conta os resultados dos ensaios laboratoriais nelas realizados.

Formação Geológica	Classificações de Solos			Classificações do Maciço Rochoso ²		
	ASTM	AASHTOO	SETRA-GTR	RMR	RQD	GSI
C ³⁻⁴	SP-SM Areia mal graduada a areia siltosa	A-3 Areia fina, com pouco silte	B2 Areias argilosas (com pouca argila)	-	-	-
C ⁴	SC Areia argilosa	A-4 Silte arenoso, pouco plástico	A2 Areia argilosa fina	4 – 29 (Muito fraco a fraco)	16% (Muito má)	-

Triássico

Os arenitos de Eirol foram encontrados em sondagem quer em maciço rochoso decomposto, quer em material desagregado. O material desagregado é descrito como areia, silte arenoso ou arenito desagregado, de grão médio a fino e um tom avermelhado, com algumas passagens de areia mais acinzentadas. O N_{SPT} destes materiais varia entre 22 e 60, porém a média encontra-se nos 55, podendo assim

² As classificações do maciço rochoso foram estimadas utilizando os dados dos ensaios uniaxiais, bem como a informação fornecida nas sondagens.

classificar estes materiais como muito compactos. O maciço encontrado encontra-se muito alterado a decomposto e muito fraturado, com cor avermelhada e passagens de areia acinzentada.

Unidade de Arada

Este material encontra-se, neste trecho, como maciço rochoso, decomposto à superfície, tornando-se menos alterado com a profundidade. Embora as sondagens não se estendam muito abaixo dos 10 metros de profundidade, por essa profundidade já ocorrem rochas medianamente alteradas. São descritas várias litologias como xistos luzentes, xistos grauvacóides e grauvaques xistentos, sendo os dois últimos os mais comuns. O solo residual resultante da alteração deste material trata-se de um solo siltoso, por vezes silto-arenoso ou silto-argiloso, com N_{SPT} médio de 55, tratando-se de um solo muito compacto. A classificação do solo com base nos resultados dos testes laboratoriais encontram-se na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 Classificação da Unidade de Arada tendo em conta os resultados dos ensaios laboratoriais nela realizados.

Formação Geológica	Classificações de Solos			Classificações de Maciço Rochoso		
	ASTM	AASHTOO	SETRA-GTR	RMR	RQD	GSi
X	GM Cascalho siltoso	A1-b Areia grosseira	C2B5 Argilas moidas (menos que 60% a 80% solos com granulometria <50 mm; esta fração tratam-se de areias muito siltosos)	18 – 30 (Muito fraca a fraca)	19% (Muito má)	20 – 30

4.4.1.1 Túnel do Mamodeiro

O Túnel do Mamodeiro tem cerca de 430 metros de extensão e localiza-se na formação dos Arenitos do Mamodeiro e nos Depósitos do Quaternário, e portanto em materiais maioritariamente arenosos de granulometria fina e com alguma composição argilosa. Quanto aos materiais rochosos encontrados, correspondentes a grés da formação C⁴, de grão fino a médio, muito alterado a medianamente alterado e fraturado.

De acordo com as sondagens, os resultados dos SPT e também o resultado dos ensaios de compressão uniaxial, é de esperar que abaixo da abóbada se encontre solo rijo a maciço rochoso brando, pouco competente, e, na zona dos portais, os níveis junto à abóbada serão constituídos por solos arenosos com compacidade a variar entre muito solta e compacta.

Neste túnel foram realizados 2 perfis sísmicos um em 2005 e um no final de 2023, de modo a determinar as condições em que o material se encontra. Os dois apresentam um resultado semelhante que corrobora com a informação conseguida nos ensaios SPT, de que, entre os 4 e os 12 metros de profundidade o solo apresenta-se mais solto e, portanto, menos competente, passando depois gradualmente a um solo mais competente, ou, possivelmente, maciço rochoso mais brando.

4.4.2 Trecho 2

Este trecho estende-se desde o km 31,490 até ao km 49,839, inserindo-se nele as Soluções B4, B5, A5, A6 e a Variante de Monte Mourão. Neste trecho inserem-se litologias das Unidades de Arada, Espinho e Lourosa, bem como aluviões, aterros e depósitos do quaternário. No Trecho 2 não existem quaisquer túneis, porém existem 3 viadutos e 5 pontes, entre as várias escavações e aterros também presentes.

Como no trecho anterior, o Trecho 2 atravessa zonas com aproveitamento agrícola e industrial na sua maioria, apenas o final se localizando numa zona mais urbanizada.

Aterro

Tal como no trecho anterior, o aterro aqui é composto por materiais areno-siltosos, com contaminação orgânica e não ultrapassando 1,5 metro de profundidade. Este facto causa que não tenha sido possível realizar ensaios de SPT de forma a melhor caracterizar este material quanto à sua compacidade.

Aluvião

Os depósitos aluvionares neste trecho são menos comuns e também menos profundos e espessos numa generalidade, rondando os 1,5 a 2,0 metros de espessura. Tratam-se de materiais especialmente siltosos, variando entre silto-argilosos e areno-siltosos, de cor castanha escura e com N_{SPT} abaixo de 10, classificando este depósito como muito solto. Os resultados dos PDL e DPSH realizados ao longo de todo o trecho corroboram esta classificação, tendo eles também mostrado valores baixos de resistência em zonas de aluvião.

Depósitos do Quaternário

Os materiais neste trecho, mostram-se um pouco mais heterogêneos, variando entre argilas siltosas e areias de grão grosseiro a média. Os valores de N_{SPT} não variam muito entre os 20 e os 30, portanto este trata-se de um solo medianamente compacto. A classificação feita com os resultados dos ensaios laboratoriais é mostrada na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 Classificação dos Depósitos do Quaternário tendo em conta os resultados dos ensaios laboratoriais nelas realizados.

Formação Geológica	Classificações		
	ASTM	AASHTOO	SETRA-GTR
Q	SC Areia argilosa	A2-4 Areia siltosa	B5 Areias muito siltosas

Unidade de Arada

Este material encontra-se, neste trecho tal como no anterior, como maciço rochoso, decomposto à superfície, tornando-se menos alterado com a profundidade. A partir de cerca dos 6 metros de profundidade a rocha já começa a aparecer menos alterada e menos fraturada. As litologias mais descritas são o xisto grauvacóide e o grauvaque xistento, com uma coloração acastanhada ou acinzentada. Em alguns casos a rocha decomposta encontra-se a debitar num solo residual areno-siltoso ou silto-argiloso, também ele de cores acastanhadas. Em termos de compactação e consolidação os materiais são muito compactos e rijos, com apenas alguns valores de N_{SPT} abaixo das 60 pancadas. Neste trecho não foram realizados ensaios laboratoriais com estes materiais, mas a classificação será semelhante à apresentada na Tabela 4.18.

Unidade de Espinho

Os materiais pertencentes a esta formação foram encontrados em sondagem num estado de maciço rochoso muito alterado a decomposto e muitíssimo fraturado. Tratam-se de grauvaques e xistos grauvacóides a debitar em solos residuais silto-arenosos com valores de N_{SPT} entre os 40 e os 60, independentemente da profundidade, o que classifica estes materiais como compactos a muito compactos. Não foram realizados ensaios laboratoriais, porém foi possível estimar as classificações do maciço rochoso, presentes na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 Classificação da Unidade de Espinho tendo em conta os resultados obtidos com os trabalhos de prospeção

Formação Geológica	Classificações de Solos			Classificações de Maciço Rochoso		
	ASTM	AASHTOO	SETRA-GTR	RMR	RQD	GSI
Xge	-	-	-	13 a 25 (Muito fraca a fraca)	4% (Muito má)	35 - 45

Unidade de Lourosa

Os materiais que compõem a Unidade de Lourosa são maciços rochosos decompostos a medianamente alterados, porém, em determinados locais, mesmo a profundidades de 30 metros, o material apresenta-se decomposto. As litologias são de xistos, migmatitos, gnaisses e grauvaques, sendo os últimos dois os mais comuns. A rocha decomposta decompõe-se, numa generalidade, em material silto-arenoso ou silto-argiloso. Os ensaios de SPT resultaram em valores de N_{SPT} a variar um pouco desde os 7 aos 60, porém encontram-se maioritariamente no intervalo dos 10 aos 50, ou seja, classificando estes solos como medianamente compactos a compactos. Na Tabela 4.21 encontra-se a classificação dos solos realizada com os resultados dos ensaios laboratoriais.

Tabela 4.21 Classificação dos Xistos de Arada tendo em conta os resultados dos ensaios laboratoriais nela realizados.

Formação Geológica	Classificações de Solos			Classificações de Maciços Rochosos		
	ASTM	AASHTOO	SETRA-GTR	RMR	RQD	GSI
Xyz	SM Areia siltosa	A2-4 Silte arenoso, pouco plástico	B5 Areias muito siltosas	33 – 45 (Fraco a regular)	8% (Muito má)	40 a 50

4.4.3 Trecho 3

O Trecho 3 do Lote A da Linha de Alta velocidade estende-se desde o km 49,839 ao km 66,112, incluindo as Soluções A7, A8 e a Variante de Vila Nova de Gaia. É também neste trecho que se encontram a maioria dos túneis presentes no traçado – Túnel do Souto, Túnel de Cassufas, Túnel de Casaldeita, Túnel de Negrelos e a parte inicial do Túnel de Vila Nova de Gaia – bem como duas pontes. Uma das razões pelas quais este trecho tem uma tão longa extensão de túneis trata-se do facto de que ao contrário dos trechos anteriores, aqui, o traçado Linha de Alta Velocidade passa pelo

meio da cidade de Vila Nova de Gaia e por zonas com uma elevada densidade populacional.

Neste trecho é expectável encontrar as formações litológicas correspondentes à Unidade de Lourosa, ao Complexo Xisto-Grauváquico e ainda os granitos da Madalena e do Porto, bem como os depósitos de aterro, os depósitos aluvionares e os depósitos do Quaternário. É também neste trecho que a Linha de Alta Velocidade interceta a ZCPTF, o que pode causar uma maior quantidade de acidentes tectónicos a afetar os materiais geológicos, nomeadamente em profundidade.

Aterro

A elevada densidade populacional nesta zona e, portanto, um maior uso do solo, fez com que neste trecho os depósitos de aterro ocorram com maior frequência, cobrindo a grande maioria da superfície, bem como terem uma maior espessura, atingindo em alguns locais mais de 4 metros. Os aterros neste trecho tornam-se bastante heterogéneos, com uma composição a variar entre areno-siltosa, silto-argilosa, siltosa, areno-silto-argilosa, entre outras, podendo apresentar vestígios de resíduos humanos. Dada a maior profundidade dos aterros foi possível realizar ensaios SPT nestes materiais, os quais deram resultados de N_{SPT} a variar entre 1 e 18, classificando estes aterros como soltos a medianamente compactos e moles a medianamente consistentes.

Aluvião

Como no caso do Trecho 2, não ocorrem linhas de água importantes neste trecho, e, portanto, os depósitos aluvionares aqui não são extensos ou profundos, não passando dos 7 metros de espessura. É descrito como um material silto-argiloso ou areno-siltoso, de coloração castanho acinzentada, e nos ensaios SPT realizados apresentou um N_{SPT} entre 5 e 10, o que classifica este aluvião como solto, ou pouco compacto. Esta interpretação é corroborada pelos valores de DPSH baixos encontrados nestes depósitos. Na Tabela 4.22 encontram-se as classificações destes materiais de acordo com os ensaios laboratoriais realizados

Tabela 4.22 Classificação dos Aluviões tendo em conta os resultados dos ensaios laboratoriais nelas realizados.

Formação Geológica	Classificações		
	ASTM	AASHTOO	SETRA-GTR
AI	SW-SM Areia bem calibrada, siltosa	A-1-b Areia grosseira	B3 Grés siltoso

Depósitos do Quaternário

Estes depósitos, tal como no caso dos aterros apresentam-se neste trecho mais espessos, chegando a ter 10 metros de espessura em alguns locais. Esta elevada espessura de depósitos pode ser explicada como estando localizado num vale tectónico que terá sido preenchido por depósitos. Estes são descritos nas sondagens como areias siltosas, ou siltes arenosos, de granulometria fina a média com seixos dispersos e, com uma observação dos valores de N_{SPT} , que variam entre 7 e 60, determina-se que embora se encontrem bastante soltos à superfície estes depósitos tornam-se mais compactos em profundidade.

Unidade de Lourosa

Neste trecho esta unidade ocupa um lugar, não só dada a sua extensão mas também dado que a maioria dos túneis serão escavados nestes materiais. Primeiramente é de salientar que as litologias desta unidade vão mudando de sul para norte, sendo que, a sul, são mais comuns os xistos e os grauvaques, tornando-se, mais a norte, mais comuns as rochas gnaissícas e migmatíticas, relacionadas possivelmente com a intrusão do granito da Madalena.

Os maciços xistentos e grauvacóides encontram-se maioritariamente decompostos, ocasionalmente muito alterados, mesmo a grandes profundidades, deitando em solos residuais silto-arenosos a areno-siltosos. Estes solos residuais, embora apresentem valores de N_{SPT} entre 10 e 30 mais à superfície em alguns locais, numa generalidade estão entre os 40 e os 60, assim, mais à superfície encontram-se medianamente compactos e em profundidade tratam-se de materiais compactos a muito compactos.

Os maciços gnaissícos e migmatíticos, por sua vez embora também se apresentem num estado decomposto até profundidades elevadas, a partir dos 20 metros é possível observar rocha medianamente alterada e medianamente fraturada. No caso dos materiais decompostos, estes deitam em solos residuais areno-siltosos, com valores de N_{SPT} semelhantes aos observados nos maciços xistentos e grauvacóides, entre os 10 e os 30 à superfície e entre os 40 e os 60 mais em profundidade, embora não atinjam profundidades tão elevadas. Foram realizados ensaios de Compressão Uniaxial nas rochas desta Unidade, apresentando estas um comportamento fraco, atingindo valores entre os 12,1 MPa e os 23,1 MPa.

Na Tabela 4.23 estão as classificações determinadas com os resultados dos ensaios laboratoriais.

Tabela 4.23 Classificação da Unidade de Lourosa tendo em conta os resultados dos ensaios laboratoriais nela realizados.

Formação Geológica	Classificações de solos			Classificações de Maciços Rochosos		
	ASTM	AASHTOO	SETRA-GTR	RMR	RQD	GSI
Xyz	SM Areia siltosa	A2-4 Silte arenoso, pouco plástico	B5 Areias muito siltosas	23 – 35 (Frac)	15 % (Muito má)	40 - 50

Granito da Madalena

Este granito encontra-se na maioria da sua extensão decomposto a muito alterado, excetuando junto à pedreira “Lages Nº7”, onde se teoriza que passe a ZCPTF, e tendo este granito intruído nesta zona de cisalhamento é de esperar que seja junto a ela que se encontre menos alterado. Efetivamente, em duas sondagens na zona a norte desta pedreira o material encontra-se menos alterado, chegando a estar pouco alterado junto à pedreira, porém a sul da mesma e um pouco mais afastado a norte o granito apresenta-se decomposto até profundidades entre os 20 e os 40 metros. Neste caso o material decomposto debita em solos residuais areno-siltosos fortemente caulinizados, soltos a medianamente compactos à superfície, com N_{SPT} entre 5 e 30, e compactos a muito compactos em profundidade, com N_{SPT} entre 35 e 60. Nesta litologia não foram recolhidas amostras para a realização de ensaios laboratoriais, porém foi possível fazer uma estimativa das classificações para o maciço rochoso, na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 Classificação do Granito da Madalena tendo em conta os resultados obtidos com os trabalhos de prospeção

Formação Geológica	Classificações de solos			Classificações de Maciços Rochosos		
	ASTM	AASHTOO	SETRA-GTR	RMR	RQD	GSI
$\gamma\pi g$	-	-	-	25 – 37 (Frac)	35 % (Má)	30 - 40

Complexo Xisto-Grauváquico

Aqui descrito como tratando-se de gnaisses e grauvaques muito decomposto a debitar em solos residuais areno-siltosos fortemente caulinizados. Esta zona do CXG encontra-se entre os contactos com os dois granitos, causando que o maciço se encontre intensamente alterado e fraturado. Os solos residuais podem ser classificados

como muito compactos dado apresentarem valores de N_{SPT} entre 50 e 60 logo aos 9 metros, apenas apresentando valores entre as 6 e as 30 pancadas até essa profundidade, sendo classificado à superfície como solto a medianamente compacto. Na Tabela 4.25 encontra-se a classificação para o maciço rochoso do CXG, estimado com os dados da prospeção.

Tabela 4.25 Classificação do Complexo Xisto-Grauváquico tendo em conta os resultados obtidos com os trabalhos de prospeção

Formação Geológica	Classificações de solos			Classificações de Maciços Rochosos		
	ASTM	AASHTOO	SETRA-GTR	RMR	RQD	GSI
CXG	-	-	-	8 – 20 (Muito fraco)	0 (Muito má)	-

Granito do Porto

Identificado na mesma sondagem que o CXG, o granito encontra-se logo abaixo num estado inicialmente decomposto, passando gradualmente a medianamente alterado e muito fraturado com o aumento da profundidade. Tal como no CXG, o granito decomposto debita em solo residual areno-siltoso fortemente caulinizado, porém muito compacto, com valores de N_{SPT} maiores que 60. Foi recolhida uma amostra de rocha para a realização de um ensaio de Compressão Uniaxial, no qual o resultado foi de 18,4 MPa, correspondente a um comportamento fraco. Na Tabela 4.26 encontra-se a classificação para o maciço rochoso do Granito do Porto, estimado com os dados da prospeção e dos ensaios de Compressão Uniaxial.

Tabela 4.26 Classificação do Granito do Porto tendo em conta os resultados obtidos com os trabalhos de prospeção

Formação Geológica	Classificações de solos			Classificações de Maciços Rochosos		
	ASTM	AASHTOO	SETRA-GTR	RMR	RQD	GSI
γm	-	-	-	25 – 37 (Fraco)	35 % (Má)	30 - 40

4.4.3.1 Túnel do Souto

É o túnel com menor extensão – 178 metros – e atravessa a Unidade de Lourosa e os Depósitos do Quaternário, os segundos na parte superior, junto à abóbada e aos emboquilhamentos.

No emboquilhamento sul o túnel atravessa a Unidade de Lourosa como maciço grauvacóide decomposto a debitar em solo areno siltoso, porém com negas logo a partir dos 3 metros. Isto indica que, embora se trate de um material terroso é também um material compacto, podendo apresentar fragmentos rochosos na matriz terrosa. Uma situação semelhante não é observada no emboquilhamento norte, que, embora também atravessasse o maciço grauvacóide decomposto, é possível que atravessasse também os depósitos do quaternário dado que aqui eles apresentam-se mais profundamente, com uma granulometria grosseira e heterogénea. O próprio maciço grauvacóide apresenta características diferentes, com valores de N_{SPT} entre os 8 e os 23 até cerca dos 21 metros de profundidade, a partir dos quais ocorrem os solos residuais mais competentes com $N_{SPT} > 60$.

Para além das sondagens, existe um perfil sísmico na zona do emboquilhamento norte. Os resultados deste perfil mostram que até aos 6 metros de profundidade nos deparamos com um material brando, e, a partir dessa profundidade materiais mais competentes. Esta informação está completamente alinhada com a informação conseguida na sondagem mais próxima, que, como referido acima, mostra através do N_{SPT} que até aos 21 metros o solo residual se mantém brando, pouco compacto. Esta discrepância causa algumas dúvidas sobre a real situação no emboquilhamento norte do túnel.

4.4.3.2 Túnel de Cassufas

O túnel seguinte estende-se por 955 metros em litologias da Unidade de Lourosa, num maciço grauvacóide decomposto a muito alterado, tanto na zona do emboquilhamento sul como a meio do túnel. No emboquilhamento sul é expectável encontrar este maciço decomposto acima da abóbada do túnel, tornando-se maciço rochoso muito alterado na zona da base, porém mesmo assim apresentando um comportamento de solo muito compacto, com um $N_{SPT} > 60$. Não há muita informação quanto ao emboquilhamento norte dado que a sondagem mais próxima se encontra, mesmo assim, a cerca de 250 metros. Esta sondagem porém apresenta materiais de comportamento competente, solos residuais compactos e rocha decomposta a muito alterada, com comportamento de solo muito compacto. Na zona central do túnel a situação mostra-se menos favorável, sendo que o N_{SPT} permanece inferior a 50 até aos 24 metros, aproximadamente a meio da galeria. De modo a precisar outros contratempos colocou-se um piezómetro nesta sondagem que, na última leitura em abril,

colocou o nível freático a uma profundidade de 7,45 metros, ou seja acima da abóbada do túnel.

Neste túnel existiam dois perfis sísmicos, um no emboquilhamento sul, e outro a meio, ambos paralelos ao eixo da via. O perfil no emboquilhamento sul mostra resultados que corroboram os resultados do SPT, com a $VL > 2\,000$ a partir dos 10 metros de profundidade, na zona do maciço rochoso. O perfil a meio do túnel também corrobora os resultados de SPT da sondagem localizada em proximidade, dado a VL se manter abaixo dos 2 000 m/s até cerca dos 28 metros, confirmando que até essa profundidade é de se esperar a existência de materiais mais brandos.

4.4.3.3 *Túnel de Casaldeita*

Este túnel estende-se também apenas em formações da Unidade de Lourosa por 2 050 metros. Este túnel atravessa um maciço gnaissíco decomposto, passando a medianamente alterado em profundidade.

Na zona do emboquilhamento sul, uma das sondagens mostra um solo residual gnaissíco medianamente compacto até aos 10 metros, a partir dos quais ocorrem negas, e, logo após encontrou-se gnaisse medianamente alterado junto aos hasteais do túnel. Este maciço rochoso, embora que apenas medianamente alterado apresentou um resultado de 23,1 MPa para a resistência à compressão uniaxial, o que leva a classificar este maciço como pouco resistente. Embora exista uma outra sondagem próxima ao emboquilhamento, esta mostra uma situação diferente, na qual o maciço rochoso nunca é intercetado e, até aos 18 metros, o N_{SPT} não ultrapassa 50, tratando-se, assim, de um cenário mais desfavorável. Esta sondagem encontra-se ligeiramente desviada do traçado, porém este cenário é uma possibilidade e deve manter-se em atenção.

Na zona central do túnel as sondagens encontraram gnaisses muito alterados a medianamente alterados a partir dos 25 metros de profundidade. O material acima dessa profundidade trata-se de um gnaisse decomposto com comportamento medianamente compacto até cerca de 15 metros, com $N_{SPT} < 30$, passando logo depois a um solo muito compacto, com $N_{SPT} \geq 60$, até encontrar rocha. Como no caso anterior, foram recolhidas amostras do maciço rochoso de forma a caracterizar a resistência à compressão uniaxial da rocha, obtendo-se também resultados baixos, de 12,3 MPa para o maciço medianamente alterado a pouco alterado, classificando-o também como pouco resistente. Numa das sondagens deste foi instalado um piezómetro que, em abril, mediu o nível freático nos 1,2 metros, muito acima da abóbada do túnel.

No emboquilhamento norte observa-se um cenário semelhante ao observado no emboquilhamento sul, tendo-se intercetado solo residual gnaissíco muito compacto até cerca de 10 metros, a partir dos quais se intercetou maciço rochoso gnaissíco medianamente alterado e medianamente fraturado. Também os resultados do ensaio à compressão uniaxial a este maciço se mostrou baixo, classificando-o também como pouco resistente, ou fraco.

Os perfis sísmicos realizados nos três pontos corroboram a informação providenciada pelas sondagens.

4.4.3.4 *Túnel de Negrelos*

O Túnel de Negrelos estende-se por 3 235 metros, atravessando duas unidades litológicas: a Unidade de Lourosa e o Granito da Madalena. Este túnel interceta ainda a ZCPTF na zona do emboquilhamento norte.

No emboquilhamento sul o túnel atravessa o maciço gnaissíco decomposto a debitar solos residuais gnaissícos da Unidade de Lourosa. Estes permanecem medianamente compacto a compacto até aos 21 metros de profundidade, só depois apresentando valores de $N_{SPT} \geq 60$, já abaixo da rasante.

Mais a norte duas sondagens encontram-se próximas ao contacto geológico entre a Unidade de Lourosa e o Granito da Madalena marcado nas cartas geológicas. O seu estudo é importante dado poder tratar-se de um acidente tectónico relacionado com a ZCPTF. Numa das sondagens intercetaram-se apenas materiais da Unidade de Lourosa até aos 40 metros, e na outra intercetou-se solo residual granítico a partir dos 12 metros de profundidade, porém, em ambos os casos, intercetou-se apenas maciço rochoso gnaissíco a debitar em solo residual. Para além disso em ambas as sondagens se encontraram depósitos de cobertura com uma espessura significativa, que, como mencionado anteriormente, pode ser uma evidência de um vale tectónico. Os solos residuais mostraram-se muito compactos a partir dos 25,5 metros de profundidade, o que leva a querer que nesta zona a escavação é toda ela feita nestes materiais. A leitura de abril do piezómetro instalado na sondagem S056A-23 coloca o nível freático a 4,65 metros de profundidade, muito acima da abóbada do túnel.

Na zona mais ao menos a meio do túnel intercetou-se apenas maciço granítico decomposto, a debitar em solo residual areno-siltoso algo caulinizado. Os ensaios de SPT deram um aumento da compacidade do solo bastante gradual, sendo que a partir

dos 13,5 metros o intervalo de N_{SPT} encontra-se entre 27 e 60, classificando o solo atravessado pela galeria do túnel como compacto a muito compacto.

No emboquilhamento norte encontra-se uma antiga pedreira de granitos, na qual é possível observar o maciço rochoso medianamente alterado a pouco alterado e medianamente fraturado a pouco fraturado. Foi também realizada uma sondagem na zona sul da pedreira na qual se intercetou este mesmo maciço à profundidade de 1,6 metros. A presença deste granito são, em comparação com o granito decomposto encontrado mais a sul confirma que esta é uma zona possivelmente afetada pela ZCPTF, sendo esta responsável pelo elevados estados de alteração e fraturação.

Os vários perfis neste túnel corroboram as informações fornecidas nas sondagens. Num deles foi possível observar uma transição abrupta de materiais decompostos a muito alterados para materiais pouco alterados. Esta situação é possível de verificar especialmente no perfil PS010A-23, presente na Figura 4.7. Neste perfil, próximo do centro, apresenta-se material rochoso com uma alteração de W4-5 a W3 próximo à superfície, transitando para valores de velocidade das ondas longitudinais mais altos logo depois. Esta situação demonstra a existência de núcleos rochosos pouco alterados no meio de material decomposto a muito alterado. É de notar que este perfil sísmico foi realizado junto à pedreira “Lages nº7” na qual se explorou Granito da Madalena, e onde é possível ver esta rocha num estado de alteração e fraturação baixo em relação ao restante do traçado.

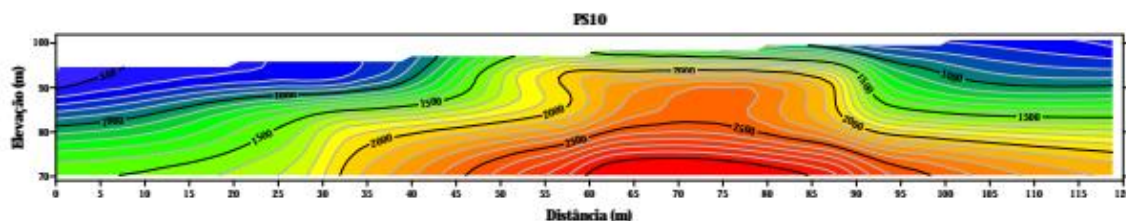


Figura 4.7 Perfil sísmico PS010A-23 (IP, 2024a).

4.4.3.5 Túnel de Vila Nova de Gaia

O Túnel de Vila Nova de Gaia encontra-se dividido em dois, tratando-se este subcapítulo do túnel antes da Estação Subterrânea de Santo Ovídio, que se estende por 2820. Esta parte do túnel interceta o Granito da Madalena, passando depois para o CXG, o qual se encontra intercalado com o Granito do Porto junto à estação.

O emboquilhamento sul deste túnel coincide com o emboquilhamento norte do Túnel de Negrelos, encontrando-se ambos na pedreira de Vilar de Paraíso. Assim a situação é semelhante: é intercetado um maciço granítico medianamente alterado a pouco alterado e medianamente fraturado a pouco fraturado, muito competente.

Mais a norte realizou-se uma sondagem de modo a determinar o estado do granito da Madalena a norte da ZCPTF. Neste local foram intercetados depósitos aluvionares a atingir profundidades de 5,3 metros, com um comportamento de compactação muito solto. A partir dessa profundidade ocorrem solos residuais graníticos compactos a muito compactos até aos 20 metros, quando se interceta rocha medianamente alterada a pouco alterada e medianamente fraturada. Nesta zona a galeria do túnel deverá intercetar maioritariamente os solos residuais muito compactos, intercetando o maciço rochoso medianamente alterado e medianamente fraturado junto à soleira.

Mais próximo do contacto geológico entre granito da Madalena e CXG, o granito volta a apresentar-se como solo residual até ao final da sondagem – 42 metros – tornando-se muito compacto apenas a partir dos 19,5 metros.

Próximo da estação de Santo Ovídio já são intercetadas as formações do CXG e o granito do Porto. O primeiro num estado decomposto até aos 27,9 metros com N_{SPT} acima dos 60 a partir dos 12 metros de profundidade, classificando o solo como muito compacto. Já o granito encontra-se como solo residual muito compacto até aos 31,4 metros de profundidade, passando depois a maciço rochoso medianamente alterado e medianamente fraturado a muito fraturado. Foi realizado um ensaio de compressão uniaxial, obtendo um valor baixo que classifica o maciço granítico nesta zona como pouco resistente.

Os núcleos rochosos em meio de material decomposto representados no PS010A-23 da Figura 4.7 é possível de acontecer neste túnel também, dada a sua continuidade em relação ao Túnel de Negrelos.

4.4.4 Trecho 4

O último trecho do traçado vai desde o km 66,112 ao km 70,472, incluindo-se nele a Solução C. Neste trecho existem a nova Estação Subterrânea de Santo Ovídio, o restante do Túnel de Vila Nova de Gaia e a nova Ponte sobre o Rio Douro. Tal como foi o caso do trecho anterior, as zonas pelas quais a Linha de Alta Velocidade passa tratam-

se de zonas extremamente urbanizadas e com alta densidade populacional, razões pelas quais as soluções são em túnel.

Neste trecho interseitam-se as unidades litológicas do Complexo Xisto-Grauváquico e do Granito do Porto, intercaladas uma com a outra, e também os depósitos de aterro e aluvionares. Embora a ZCPTF seja mais a sul, afetando especialmente o Trecho 3, este Trecho continua a ser afetado fortemente por acidentes tectónicos, nomeadamente na zona da nova estação.

Aterro

A elevada densidade populacional nesta área, tal como na anterior, e, consequentemente, o maior uso do solo, resultaram numa maior frequência de depósitos de aterro, que cobrem a maior parte da superfície e apresentam maior espessura, atingindo mais de 10 metros em alguns locais. Os aterros nesta área são bastante heterogêneos, com composições que variam entre areno-siltosa, silto-argilosa, siltosa, areno-silto-argilosa, entre outras, podendo conter vestígios de resíduos humanos e material orgânico. Devido à maior profundidade dos aterros, foi possível realizar ensaios SPT nesses materiais, que apresentaram resultados de NSPT variando entre 1 e 25, classificando esses aterros como soltos a medianamente compactos e medianamente consistentes a duros.

Aluvião

Neste trecho foram encontrados aluviões apenas na zona da estação, porém sabe-se que, no leito do Rio Douro os aluviões apresentam uma espessura muito elevada. No que toca aos aluviões encontrados, tratam-se de areias silto-argilosas com seixo, soltas, tendo dado “nega” na zona em que se descreve a existência de seixos.

CXG

As litologias do CXG neste trecho final do traçado são descritas como migmatitos decompostos mais próximos da superfície, passando a medianamente alterados em profundidade. O migmatito decomposto é substituído por solo residual areno-siltoso a areno-silto-argiloso, muito compacto e rijo, dado os valores de $N_{SPT} > 60$. Foi realizado um ensaio de compressão uniaxial nestes materiais, ajudando a estimar as classificações para o maciço rochoso presente na Tabela 4.27.

Tabela 4.27 Classificação do Complexo Xisto-Grauváquico tendo em conta os resultados obtidos com os trabalhos de prospeção.

Formação Geológica	Classificações de solos			Classificações de Maciços Rochosos		
	ASTM	AASHTOO	SETRA-GTR	RMR	RQD	GSI
CXG	-	-	-	30 – 42 (Fraco a regular)	28 % (Má)	30 - 40

Granito do Porto

Neste trecho o Granito do Porto encontra-se intercalado com o CXG, aparecendo em certas zonas mais alterado, porém, no geral, apresenta-se decomposto a debitar em solo residual mais próximo da superfície e menos alterado em profundidade. O solo residual é areno-siltoso alaranjado e com forte componente feldspática, tratando-se, geralmente, de solos muito compactos dado que os valores de N_{SPT} variam muito pouco para além do intervalo de 50 a 60. Foram recolhidas amostras de forma a realizar ensaios de compressão uniaxial, para estimar as classificações do maciço rochoso, na Tabela 4.28.

Tabela 4.28 Classificação do Granito do Porto tendo em conta os resultados obtidos com os trabalhos de prospeção

Formação Geológica	Classificações de solos			Classificações de Maciços Rochosos		
	ASTM	AASHTOO	SETRA-GTR	RMR	RQD	GSI
γm	-	-	-	39 – 48 (Fraco a Regular)	28 % (Má)	40 - 50

4.4.4.1 Estação Subterrânea de Santo Ovídio

Esta estação planeia-se que tenha, ao todo 500 metros de comprimento, estando localizada no meio do Túnel de Vila de Nova de Gaia, e abaixo da já existente Estação de Santo Ovídio do Metro do Porto. Está localizada numa rede de intercalações entre o CXG e o Granito do Porto, possivelmente condicionada por uma série de falhas.

Na metade sul da estação não existem muitos ensaios, sendo possível concluir apenas que, possivelmente, as mesmas intercalações que ocorrem antes da estação e na segunda metade da mesma se mantém.

No primeiro par de sondagens localizado a meio da estação verificou-se presença de maciço rochoso migmatítico intercalado com maciço rochoso granítico. A rocha encontra-se, em ambos os casos, decomposta em solo residual à superfície, passando

a rocha medianamente alterada a pouco alterada a partir dos 30 metros. Ambos os solos residuais apresentam um $N_{SPT} > 60$, tratando-se de solos muito compactos, sendo diferenciados especificamente quanto à composição e à fração argilosa presente, em maior quantidade no solo residual granítico. O ensaio à compressão uniaxial foi realizado ao material do CXG nesta zona, dando um resultado razoável, classificando a rocha como medianamente resistente.

O segundo par de sondagens não se mostra tão simples, com uma das sondagens a não atingir maciço rochoso e a outra a atingir maciço rochoso medianamente alterado a partir dos 50 metros de profundidade. Dada a proximidade das duas sondagens, apenas distanciadas em 10 metros, uma das razões para esta elevada diferença pode ser a existência de estruturas tectónicas afetar a estação. No caso do maciço rochoso encontrado este trata-se de maciço rochoso granítico, medianamente alterado e com fraturação irregular, nalguns locais mais espaçada enquanto em outros muito próxima. O ensaio de compressão uniaxial feito neste maciço mostrou um valor baixo para a resistência da rocha, classificando-a como pouco resistente. No que toca aos solos residuais, embora se estendam a profundidades superiores, ambos mostram que, a partir dos 10 metros de profundidade o material se torna muito compacto com a ocorrência de “negas”.

O caso mencionado acima volta a repetir-se no terceiro par de sondagens, mais uma vez uma das sondagens não tendo intercetado o maciço rochoso, porém a outra apresenta maciço granítico medianamente alterado a muito alterado e muito fraturado logo após os 27 metros de profundidade, diminuindo os graus de alteração e fraturação em profundidade. A mesma razão apresentada no parágrafo acima pode ser aqui aplicada para explicar esta discrepância. Os solos residuais graníticos intercetados mostram-se muito compactos, com “negas” a partir dos 15 metros de profundidade. Outro detalhe a ter em atenção nestas sondagens é a presença de um aterro invulgarmente espesso, com mais de 10 metros de espessura, encontrando-se na sua base uma camada de aluvião, podendo esta zona tratar-se de uma linha de água antiga.

O quarto par de sondagens já apresenta uma situação mais favorável, na qual ambas as sondagens intercetam maciço rochoso a partir dos 25/30 metros de profundidade. O maciço granítico encontra-se decomposto na superfície, mostrando-se medianamente alterado a pouco alterado em profundidade. O solo residual proveniente do maciço decomposto apresenta-se caulinizado, e, em termos de compactação passa diretamente de um estado medianamente alterado nos primeiros 10 metros, para valores de $N_{SPT} > 60$, tornando-se um solo muito compacto.

No último par de sondagens uma situação semelhante à anterior permanece, com maciço rochoso a ser intercetado aos 20 metros de profundidade num estado medianamente alterado e muito fraturado. O solo residual granítico localizado acima do maciço apresenta-se também caulinizado e medianamente compactado nos primeiros metros, passando a muito compacto logo a seguir, com resultados de $N_{SPT} > 60$ logo após os resultados de $N_{SPT} < 30$.

4.4.4.2 Túnel de Vila Nova de Gaia

A segunda parte do Túnel de Vila Nova de Gaia atravessa litologias do CXG e do Granito do Porto ao longo de 1 383 metros.

As últimas sondagens da Estação Subterrânea de Vila Nova de Gaia dizem respeito também ao início desta parte do túnel, dado se ligam. Assim para este recomeço do túnel é de esperar a existência de maciço granítico medianamente alterado a partir dos 20 metros, com um solo residual granítico caulinizado, medianamente compacto a muito compacto logo acima.

No centro do túnel intercetaram-se solos residuais graníticos e migmatíticos, materiais estes que logo desde a superfície deram valores altos de N_{SPT} , com “negas” aos 3 metros, tratando-se assim de solos residuais areno siltosos muito compactos, e, no caso do solo residual granítico, caulinizado.

No emboquilhamento norte do túnel intercetou-se maciço rochoso granítico medianamente alterado logo após a camada de aterro e uma fina camada de granito decomposto a muito alterado, aos 1,1 metros. O maciço rochoso, embora não muito alterado nem fraturado, apresentou um valor de resistência à compressão uniaxial muito baixo, de 5,5, caracterizando o maciço nesta zona como muito pouco resistente.

4.4.5 Ligação de Canelas à Linha do Norte

Embora a Ligação de Canelas se insira no Trecho 1, apresenta um traçado próprio, separado do restante, a não ser na zona de ligação. Esta parte do traçado atravessa a Unidade de Arada, para além dos depósitos de aterro e aluvionares. A maioria da ligação é feita por viadutos, os quais passam por cima dos materiais aluvionares da zona do Baixo Vouga Lagunar.

Aterro

Os aterros nesta área são pouco profundos, não excedendo um metro de espessura, sendo compostos por materiais areno-siltosos, frequentemente contendo seixos ou contaminação orgânica. Devido à limitada espessura, não foi possível realizar ensaios de SPT para determinar sua compactidade.

Aluvião

Nesta ligação encontramos aluviões com até 26 metros de espessura compostos, compostos por areias finas siltosas lodosas e, por vezes seixos rolados na base do aluvião, denominados também por “cascalheira de base”. A maioria do aluvião apresenta valores de N_{SPT} não maiores do que 1, tratando-se portanto de um material muito solto, as “negas” que ocorrem em material aluvionar correspondem aos materiais da cascalheira de base.

Unidade de Arada

Nesta ligação, o material encontra-se como um maciço rochoso, decomposto na superfície e tornando-se menos alterado com a profundidade. As litologias descritas tratam-se de xistos grauvacóides e grauvaques, os segundos apresentando-se mais alterados do que os anteriores. O solo residual resultante da alteração deste material é um solo silto-argiloso ou argilo-siltoso, com um $N_{SPT} > 60$, classificando-se como um solo muito compacto. As classificações de solos e de maciço rochoso serão semelhantes às apresentadas na Tabela 4.18.

5 Conclusão

A participação num estágio em contexto empresarial permitiu à estudante, para além do primeiro contacto com uma empresa, o contacto com profissionais dedicados e experientes na sua área e em áreas vizinhas, bem como uma noção prática dos conhecimentos adquiridos durante o mestrado e durante o próprio estágio.

A Geologia aplicada à engenharia trata-se de uma disciplina complexa que engloba a necessidade da aluna não só de compreender novos contextos no que toca à geologia, mas também dentro da engenharia, de forma a entender como é que o seu trabalho pode ser aproveitado pelos seus colegas de outras áreas. Dentro das várias áreas da engenharia, a geotecnia apresenta-se como aquela com maior contacto com a geologia, existindo uma importante conjugação entre elas. Este facto foi percebido durante o trabalho no projeto tema deste estágio, em que vários foram os momentos de contacto com os engenheiros geotécnicos da empresa, dando uma oportunidade de melhor entender esta cooperação, na qual o trabalho realizado pelos geólogos e os seus resultados afetam algumas decisões tomadas, nomeadamente no que toca aos métodos usados na escavação e suporte nos túneis e taludes existentes. Este contacto com uma disciplina diferente da geologia permitiu uma assimilação de conhecimentos sobre a mesma.

O estudos dos ensaios acima mencionados proporcionou a uma compreensão dos mesmos, como são realizados, as propriedades que analisam e como interpretar os seus diagramas e resultados. Outras atividades como a pesquisa de informação sobre a área de estudo permitiram um aperfeiçoamento do conhecimento da estudante quanto à história geológica da área de estudo, expandindo os seus conhecimentos nas diversas áreas da geologia. O decorrer do projeto permitiu também uma compreensão das dificuldades encontradas durante uma proposta desta dimensão, seja ela entre as variadas pessoas e entidades envolvidas, ou mesmo dentro das responsabilidades de cada um, mostrando como é que as mesmas devem ser encaradas e resolvidas.

6 Referências Bibliográficas

- AASHTO. (2021). *M 145-91. Standard Specification for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes.*
- AFNOR. (1992). NF P 11-300. Classification des Sols et GTR. In *Normes Françaises. LCPC/SETRA.*
- Almeida, A. (2001). Geochemical and geochronological characterization of the syn-tectonic two-mica granite of Porto (NW Portugal). *III Congresso Ibérico de Geoquímica e VIII Congresso de Geoquímica de Espanha*, 311–315.
- Almeida, A., Santos, J. F., & Noronha, F. (2014). Contribuição dos sistemas isotópicos Sm-Nd e Rb-Sr para o estudo petrogenético do maciço granítico peraluminoso de duas micas da cidade do Porto (NW Portugal). *Comunicações Geológicas*, 101(Especial I), 27–30. <http://www.lneg.pt/iedt/unidades/16/paginas/26/30/185>
- Almeida, A., Santos, J. F., & Noronha, F. (2015, October). Discussão sobre a determinação da idade do granito do Porto pelo sistema Rb-Sr: implicações do valor da constante de decaimento do ^{87}Rb . *X Congresso Ibérico de Geoquímica.*
- Almeida, C., Mendonça, J. J. L., Jesus, M. R., & Gomes, A. J. (2000). *Sistemas Aquíferos de Portugal Continental: Vol. I.*
- Almeida, N., Silva, M. E., Fonseca, P. E., Bezerra, M. H., Basei, M., Chaminé, H. I., & Tassinari, C. (2014). Novos dados geocronológicos do Finisterra. *Comunicações Geológicas*, 101(Especial I), 31–34. <http://www.lneg.pt/iedt/unidades/16/paginas/26/30/185>
- ASTM. (2007). *D1557-07. Standards methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort.*
- Atlas do Ambiente. (1996). *Carta de Isocistas Máximas Observadas.*
- Azor, A., Lodeiro, F. G., Simancas, J. F., & Bea, F. (1995). Geochronological constraints on the evolution of a suture: the Ossa-Morena/Central Iberian contact (Variscan Belt, south-west Iberian Peninsula). *Geologische Rundschau*, 84(2), 375–383. <https://doi.org/10.1007/BF00260447>
- Barbosa, B. P. (1981a). Folha 16-C - Vagos. In *Carta Geológica de Portugal - Escala 1:50 000*. Direção Geral de Geologia e Minas.
- Barbosa, B. P. (1981b). Notícia Explicativa da Folha 16-C. In *Carta Geológica de Portugal - Escala 1:50 000*. Direção Geral de Geologia e Minas.

- Bea, F., Montero, P., González-Lodeiro, F., & Talavera, C. (2007). Zircon Inheritance Reveals Exceptionally Fast Crustal Magma Generation Processes in Central Iberia during the Cambro-Ordovician. *Journal of Petrology*, 48(12), 2327–2339. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm061>
- Beetsma, J. J. (1995). *The late Proterozoic/Paleozoic and the Hercynian crustal evolution of the Iberian Massif, N Portugal* [Dissertação de Doutoramento]. Vrije University.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. John Wiley & Sons, Inc.
- Callapez, P. (1999, July 25). The Cenomanian - Turonian of the Western Portuguese Basin: Stratigraphy and Paleobiology of the Central and Northern Sectors. *European Paleontological Association Workshop*.
- Cândido de Medeiros, A., & Teixeira, C. (1963). Folha 13-B - Castelo de Paiva. In *Carta Geológica de Portugal - Escala 1:50 000*. Direção Geral de Minas e Serviços Geológicos.
- Carrington da Costa, J., & Teixeira, C. (1957). Notícia Explicativa da Folha 9-C. In *Carta Geológica de Portugal - Escala 1:50 000*. Serviços Geológicos de Portugal.
- Carrington da Costa, J., Teixeira, C., & Cândido de Medeiros, A. (1957). Folha 9-C - Porto. In *Carta Geológica de Portugal - Escala 1:50 000*. Direção Geral de Minas e Serviços Geológicos.
- Carvalho, D. R., Bento dos Santos, T., Chichorro, M., Solá, A. R., Romão, J., & Moreira, N. (2019). Análise geoquímica preliminar das unidades metassedimentares do Terreno Finisterra. *XII Congresso Ibérico de Geoquímica*, 149–152. <https://www.researchgate.net/publication/336749918>
- Chaminé, H. I. (2000). *Estratigrafia e estrutura da faixa metamórfica de Espinho-Albergaria-a-Velha (Zona de Ossa Morena): implicações geodinâmicas* [Dissertação de Doutoramento]. Universidade do Porto.
- Costa, J. C. S. da. (1950). *Notícia sobre uma carta Geológica do Buçaco de Nery Delgado*. Sociedade Geológica de Portugal.
- Delgado, J. F. N. (1908). *Système Silurique du Portugal*. Académie Royale des Sciences.

- Dias, R., & Ribeiro, A. (1993). Porto-Tomar shear zone, a major structure since the beginning of the Variscan orogeny. *Comunicações Do Instituto Geológico e Mineiro*, 79, 31–40.
- Faure, M., Sommers, C., Melleton, J., Cocherie, A., & Lautout, O. (2010). The Léon Domain (French Massif Armoricaín): a westward extension of the Mid-German Crystalline Rise? Structural and geochronological insights. *International Journal of Earth Sciences*, 99(1), 65–81. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0360-x>
- Franke, W. (2000). The mid-European segment of the Variscides: tectonostratigraphic units, terrane boundaries and plate tectonic evolution. *Geological Society, London, Special Publications*, 179(1), 35–61. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.179.01.05>
- Franke, W., & Dulce, J.-C. (2017). Back to sender: tectonic accretion and recycling of Baltica-derived Devonian clastic sediments in the Rheno-Hercynian Variscides. *International Journal of Earth Sciences*, 106(1), 377–386. <https://doi.org/10.1007/s00531-016-1408-y>
- Grotzinger, J. P., & Jordan, T. H. (2014). *Understanding Earth* (Seventh Edition). W. H. Freeman & Company.
- Hoek, E. (2006). *Practical Rock Engineering*.
- IP. (2023). *Estudo de Impacte Ambiental, Resumo Não-Técnico, Linha Ferroviária de Alta Velocidade entre Porto e Lisboa - Fase 1: Troço Porto / Soure - Lote A - Troço Aveiro (Oíã) / Porto (Campanhã)*.
- IP. (2024a). *Estudo Prévio. Linha Ferroviária de Alta Velocidade entre Porto e Lisboa - Fase 1: Troço Porto / Soure Lote A - Troço Aveiro (Oíã) / Porto (Campanhã)*.
- IP. (2024b). *Nova Linha Porto-Lisboa - Reconhecimento Geológico-Geotécnico Complementar dos Estudos Prévios do Lote A - Aveiro (Oíã) / Porto (Campanhã)*.
- IPQ. (2009). NP EN 1998-1:2009. Eurocódigo 8: Projeto de estruturas para resistência aos sismos - Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios. In *Normas Portuguesas*. www.ipq.pt
- IPQ. (2017). NP EN 933-9:2009+A1:2017. Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 9: Avaliação dos finos - Ensaio do azul de metileno. In *Normas Portuguesas*. www.ipq.pt

- ISO. (2002). ISO 22476-2:2002. Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 2: Dynamic probing. In *International Standards*. <http://www.bsi-global.com>.
- ISO. (2005). ISO 22476-3:2005. Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 3: Standard penetration test. In *International Standards*. International Standard Organization.
- ISO. (2014). ISO 17892-1:2014. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 1: Determination of water content. In *International Standards*. International Standards Organization. www.iso.org
- ISO. (2016). ISO 17892-4:2016. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 4: Determination of particle size distribution. In *International Standards*. British Standards Organization.
- ISO. (2017). ISO 14689:2017. Geotechnical investigation and testing - Identification, description and classification of rock. In *International Standards*. European Committee for Standardization.
- ISO. (2018). ISO 17892-12:2018. Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Parte 12: Determination of liquid and plastic limits. In *International Standards*.
- ISO. (2021). ISO 22475-1:2021. Geotechnical investigation and testing - Sampling methods and groundwater measurements - Part 1: Technical principles for the sampling of soil, rock and groundwater. In *International Standards*.
- ISRM. (1978). Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(6), 319–368.
- ISRM. (1981). Basic Geotechnical Description of Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18, 85–110.
- Julivert, M., Fontboté, J. M., Ribeiro, A., & Conde, L. E. N. (1974). *Mapa Tectónico de la Península Ibérica y Baleares, Escala 1:1 000 000 e Memória Explicativa*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Lacroix, A. (1933). Sur quelques granites des environs de Porto. *Publicações Do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico Da Faculdade de Ciências Do Porto*, 18(1), 43–48.

- LNEC. (1967a). LNEC E 198-1967. Determinação do CBR. In *Especificações LNEC*.
- LNEC. (1967b). LNEC E 199-1967. Ensaio de equivalente de areia. In *Especificações LNEC*.
- LNEC. (1969). NP 143:1969. Determinação dos limites de consistência. In *Normas Portugalsas*.
- LNEC. (1970). LNEC E 240:1970. Classificação de Solos para Fins Rodoviários. In *Especificações LNEC*.
- LNEG. (2010). *Carta Geológica de Portugal - Escala 1:1 000 000*. Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- Lotze, F. (1945). *Zur Geologie der Iberischen Meseta I*. Schweizerbart Science Publishers.
- Martins, H. C. B., Ribeiro, M. A., Sant'ovaia, H., Abreu, J., & Garcia De Madinabeitia, S. (2014). SHRIMP and LA-ICPMS U-Pb zircon geochronology of post-tectonic granitoid intrusions in NW of Central Iberian Zone. *Comunicações Geológicas*, 101(Especial I), 147–150. <http://www.lneg.pt/iedt/unidades/16/paginas/26/30/185>
- Mendes, F. (1967). Contribution à l'étude géochronologique, par le method au strontium, des formations cristallines du Portugal. *Boletim Do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico Da Universidade de Lisboa*, 11(1).
- Moreira, N. (2012). *Caracterização estrutural da zona de cisalhamento Tomar-Badajoz-Córdova no setor de Abrantes* [Tese de Mestrado, Universidade de Évora]. <http://hdl.handle.net/10174/14584>
- Moreira, N., Dias, R., Ribeiro, A., Romão, J., Noronha, F., & Pedro, J. C. (2017). Can the Iberian Finisterra Terrane extends until Central Europe Variscides? In A. Rahimi, H. Saber, A. Habib, T. Abu Alam, & A. Lagnaoui (Eds.), *First International ASRO Geological Congress* (pp. 59–60). ASRO.
- Moreira, N., Noronha, F., Pedro, J., Romão, J., Dias, R., Sousa, M., & Ribeiro, A. (2019). Significado geodinâmico do magmatismo máfico do Terreno Finisterra: a existência de um episódio de estiramento crustal. *XII Congresso Ibérico de Geoquímica*, 75–78. <https://www.researchgate.net/publication/336749597>
- Moreira, N., Romão, J., Dias, R., Ribeiro, A., & Pedro, J. (2019). The Finisterra-Léon-Mid German Crystalline Rise Domain; Proposal of a New Terrane in the Variscan

- Chain. In C. Quesada & J. T. Oliveira (Eds.), *The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach - Volume 2: The Variscan Cycle* (pp. 207–228). Springer.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-10519-8>
- Pais, J., & Trincão, P. (1983). Contribuições para o estudo estratigráfico e paleobotânico dos «Grés Grosseiros Inferiores» (Arenitos do Carrascal). *Ciências Da Terra*, 7, 141–160.
- Palain, C. (1976). Une série détritique terrigène. Les “Grés de Silves”: Trias et Lias inférieur du Portugal. *Memórias Dos Serviços Geológicos de Portugal*, 25.
- Pereira, E., Moreira, A., Gonçalves, S., Rodrigues, J., Silva, A. F., & Cunha, T. A. (2006). Folha 13-D - Oliveira de Azeméis. In *Carta Geológica de Portugal - Escala 1:50 000*. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, IP.
- Pereira, M. F., Brandão Silva, J., Chichorro, M., Medina, J., & Solá, A. M. R. (2010). Evolução Estratigráfica do Sudoeste do Maciço Ibérico do Ediacarano ao Devónico Inferior. *Ciências Geológicas - Ensino e Investigação e Sua História*, 1(3), 377–389.
- Quesada, C., Apalategui, O., Eguiluz, L., Liñan, E., Palacios, T., Robardet, M., Marco, J. C. G., Gabaldon, V., Carretero, R. S., Pascual, E., Carracedo, M., Munha, J., Locutura, J., Tornos, F., Florido, P., & Baeza, L. (1990). Ossa-Morena Zone. In R. D. Dallmeyer & E. M. Garcia (Eds.), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia* (pp. 249–330). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-83980-1>
- Ribeiro, A., Antunes, M. T., Ferreira, M. P., Rocha, R. B., Soares, A. F., Zbyszewski, G., Almeida, F. M. de, Carvalho, D. de, & Monteiro, J. H. (1979). *Introduction à la géologie générale du Portugal*. Serviços Geológicos de Portugal.
- Ribeiro, A., Munhá, J., Dias, R., Mateus, A., Pereira, E., Ribeiro, L., Fonseca, P., Araújo, A., Oliveira, T., Romão, J., Chaminé, H., Coke, C., & Pedro, J. (2007). Geodynamic evolution of the SW Europe Variscides. *Tectonics*, 26(6), 1–24.
<https://doi.org/10.1029/2006TC002058>
- Ribeiro, A., Munhá, J., Mateus, A., Fonseca, P., Pereira, E., Noronha, F., Romão, J., Rodrigues, J., Castro, P., Meireles, C., & Ferreira, N. (2009). Mechanics of thick-skinned Variscan overprinting of Cadomian basement (Iberian Variscides). *Comptes Rendus. Géoscience*, 341(2–3), 127–139.
<https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.12.003>

- Ribeiro, A., Quesada, C., & Dallymeyer, R. D. (1990). Geodynamic Evolution of the Iberian Massif. In R. D. Dallmeyer & E. M. Garcia (Eds.), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia* (pp. 399–409). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-83980-1>
- RSA. (1983). *Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes*. Porto Editora.
- Sant’ovaia, H., Ribeiro, M. A., Martins, H. C. B., Ferrão, F., Gomes, C., & Noronha, F. (2014). Estruturas e fabric magnético no maciço granítico de Lavadores-Madalena. *Comunicações Geológicas*, 101(Especial I), 313–317. <http://www.lneg.pt/iedt/unidades/16/paginas/26/30/185>
- SGP. (1992a). Folha Norte - Escala 1:500 000. In *Carta Geológica de Portugal*. Serviços Geológicos de Portugal.
- SGP. (1992b). Folha Sul - Escala 1:500 000. In *Carta Geológica de Portugal*. Serviços Geológicos de Portugal.
- Silva, A. F. da. (2005). *A Litoestratigrafia e Estrutura do Supergrupo Dúrico-Beirão (Complexo Xisto-Grauváquico), em Portugal, e sua Correlação com as Correspondentes Sucessões em Espanha*.
- Silva, A. F. da, Rebelo, J. A., Ribeiro, M. L., Ribeiro, A., & Cabral, J. (1988). Folha 11-C - Torre de Moncorvo. In *Carta Geológica de Portugal - Escala 1:50 000*. Serviços Geológicos de Portugal.
- Simancas, J. F. (2019). Variscan Cycle. In C. Quesada & J. T. Oliveira (Eds.), *The Geology of Iberia: A Geodynamic Approach - Volume 2: The Variscan Cycle* (Vol. 2, pp. 1–25). Springer. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-10519-8>
- Soares, A. F. (1967). *Estudo das formações pós-jurássicas das regiões entre Sargento-Mor e Montemor-o-Velho (margem direita do Rio Mondego)* [Dissertação de Doutoramento]. Universidade de Coimbra.
- Teixeira, C. (1963). Folha 13-C - Ovar. In *Carta Geológica de Portugal - Escala 1:50 000*. Direção Geral de Minas e Serviços Geológicos.
- Teixeira, C. (1975). Folha 16-A - Aveiro. In *Carta Geológica de Portugal - Escala 1:50 000*. Direção Geral de Minas e Serviços Geológicos.

- Teixeira, C. (1981). *Geologia de Portugal, Vol I - Precâmbrico, Paleozóico* (Vol. 1). Fundação Calouste Gulbenkian.
- Teixeira, C., & Perdigão, J. C. (1962). Folha 13-A - Espinho. In *Carta Geológica de Portugal - Escala 1:50 000*. Direção Geral de Minas e Serviços Geológicos.
- Teixeira, C., Perdigão, J., & Torre de Assunção, C. (1962). Notícia Explicativa da Folha 13-A. In *Carta Geológica de Portugal - Escala 1:50 000*. Serviços Geológicos de Portugal.
- Teixeira, C., & Torre de Assunção, C. (1963). Notícia Explicativa da Folha 13-C. In *Carta Geológica de Portugal - Escala 1:50 000*. Serviços Geológicos de Portugal.
- Teixeira, C., & Zbyszewski, G. (1976). Notícia Explicativa da Folha 16-A. In *Carta Geológica de Portugal - Escala 1:50 000*. Direção Geral de Minas e Serviços Geológicos.
- Vallejo, L. I. G., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2004). *Ingeniería Geológica* (I. Capella, Ed.; First). Pearson Educación.
- Vidal, G., Palacios, T., Gámez-Vintaned, J. A., Balda, M. A. D., & Grant, S. W. F. (1994). Neoproterozoic-early Cambrian geology and paleontology of Iberia. *Geological Magazine*, 131(6), 729–765. <https://doi.org/10.1017/S001675680001284X>
- Vilas, L., San Jose, M. A. de, Pieren, A. P., Garcia-Hidalgo, J. F., Herranz, P., Pelaez, J. R., Perejon, A., Marco, J. C. G., Balda, M. D., Vegas, R., Lodeiro, F. G., Ugidos, J. M., Martinez, F. J., Corretge, L. G., Suarez, O., Gumiel, P., & Arribas, A. (1990). Central-Iberian Zone - Autochthonous Sequences. In R. D. Dallmeyer & E. M. Garcia (Eds.), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia* (pp. 145–219). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-83980-1>
- Wagner, A. A. (1957). The Use of the Unified Soil Classification System by the Bureau of Réclamation. *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 125–134. <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- Whitlow, R. (1995). *Basic Soil Mechanics* (C. Bassett, Ed.; Third). Longman.
- Wilson, R. C. L. (1988). Mesozoic Development of the Lusitanian Basin, Portugal. *Revista de La Sociedad Geológica de España*, 1(3–4), 393–407.

Woessner, W. W., & Poeter, E. P. (2020). *Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow* (J. Cherry & E. Poeter, Eds.). Groundwater Project.

7 Anexos

7.1 Anexo 1 – Mecânica das Rochas

Tabela 7.1 Parâmetros para o cálculo do RMR básico (adaptado de Bieniawski, 1989).

1	Resistência da matriz rochosa (MPa)	Ensaio de Carga Pontual	> 10	10 – 4	4 – 2	2 – 1	Compressão Simples		
		Compressão simples	> 250	250 – 100	100 – 50	50 – 25	25 - 5	5 - 1	< 1
		Pontuação	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		100 – 90 %	90 – 75 %	75 – 50 %	25 – 50 %	< 25 %		
	Pontuação		20	17	13	6	3		
3	Espaçamento entre Descontinuidades		F1 (> 2 m)	F2 (2 – 0,6 m)	F3 (0,6 – 0,2 m)	F4 (0,2 – 0,06 m)	F5 (< 0,06 m)		
	Pontuação		20	15	10	8	5		
4	Características das Descontinuidades	Continuidade	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m		
		Pontuação	6	4	2	1	0		
		Abertura	Fechada	< 0,1 mm	0,1 – 1,0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm		
		Pontuação	6	5	3	1	0		
		Rugosidade	Muito Rugosa	Rugosa	Ligeiramente Rugosa	Ondulada	Suave		
		Pontuação	6	5	3	1	0		
		Preenchimento	Nenhum	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Brando < 5 mm	Brando > 5 mm		
		Pontuação	6	4	2	1	0		
		Alteração	Inalterada	Pouco Alterada	Moderadamente Alterada	Muito Alterada	Decomposta		
		Pontuação	6	5	3	1	0		
5	Água Frática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 l/min	10 – 25 l/min	25 – 125 l/min	> 125 l/min		
		Pressão de água/Tensão principal maior	0	0 – 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	> 0,5		
		Estado geral	Seco	Ligeiramente Húmido	Húmido	Gotejante	Água a Fluir		
		Pontuação	15	10	7	4	0		

Tabela 7.2 Guia para a escavação e suporte de túneis (adaptado de Bieniawski, 1989).

Classe do Maciço	Escavação	Suporte		
		Pregagens	Betão Projetado	Cambotas
I – Muito Boa RMR: 81 – 100	Secção total 3 m de avanço	Geralmente não requer suporte com a exceção de pregagens ocasionais		
II – Boa RMR: 61 – 80	Secção total 1 a 1,5 m de avanço Suporte completo a 20 m da frente	Pregagens de 3 m de comprimento Espaçadas de 2,5 m Malha ocasional em certas zonas do teto	50 mm no teto quando necessário	Nenhum
III – Regular RMR: 41 – 60	Secção parcial (frente e rebaixo) Avanço 1,5 a 3 m Início do suporte após cada fogo Suporte completo a 10 m	Pregagens sistemáticas de 4 m de comprimento Espaçadas de 2 m nas paredes e teto Malha no teto	50 a 100 mm no teto 30 mm nas paredes	
IV: Fraca RMR: 21 – 40	Secção parcial (frente e rebaixo) 1 a 1,5 m de avanço Instalação do suporte concomitantemente com a escavação	Pregagens sistemáticas com 4 a 5 m de comprimento Espaçadas de 1 a 1,5 m Malha no teto e nas paredes	100 a 150 mm no teto 100 mm nas paredes	Cambotas leves espaçadas de 1,5 m
V: Muito Fraca RMR: ≤ 20	Secções múltiplas Avanço de 0,5 a 1,5 m Instalação do suporte concomitantemente com a escavação Betão projetado logo após o fogo	Pregagens sistemáticas com 5 a 6 m de comprimento Espaçadas de 1 a 1,5 m Malha no teto e nas paredes Pregagens na soleira		Cambotas médias a pesadas de 0,75 m Fechamento da soleira

7.2 Anexo 2 – Mecânica dos Solos

Tabela 7.3 Sistema Unificado de Classificação de Solos por Casagrande.

Identificação em campo (excluído partículas maiores e 7,6 cm)				Símbolo do Grupo	Nomenclatura	
Solos de grão grosseiro (mais de metade do material > 75 micras)	Cascalho (mais de metade do material > 100 mm)	Cascalho limpo (com poucos ou nenhuns finos)	Ampla gama de tamanhos e quantidades significativas de tamanhos intermédios	GW	Cascalho bem calibrado, com areia e poucos ou nenhuns finos	
			Predominância de um tamanho, com ausência de tamanhos intermédios	GP	Cascalho mal calibrado, com areia e poucos ou nenhuns finos	
		Cascalho com finos (quantidade significativa de finos)	Fração fina não plástica (Grupo ML, mais a baixo)	GM	Cascalho siltoso, mistura mal calibrada de cascalho, areia e silte	
			Fração fina plástica (Grupo CL, mais a baixo)	GC	Cascalho argiloso, mistura mal calibrada de cascalho, areia e argila	
	Areia (mais de metade do material < 100 mm)	Areia limpa (com poucos ou nenhuns finos)	Ampla gama de tamanhos e quantidades significativas de tamanhos intermédios	SW	Areia bem calibrada, com cascalho e poucos ou nenhuns finos	
			Predominância de um tamanho, com ausência de tamanhos intermédios	SP	Areia mal calibrada, com cascalho e poucos ou nenhuns finos	
		Areia com finos (quantidade de finos significativa)	Fração fina não plástica (Grupo ML, mais a baixo)	SM	Areias siltosas, mistura de areia e silte mal calibrada	
			Fração fina plástica (Grupo CL, mais a baixo)	SC	Areia argilosa, mistura de areia e argila mal calibrada	
Métodos de identificação para a fração menor < 75 micras						
		Resistência quando seco (à desagregação)	Espalhamento (reação à agitação)	Plasticidade (consistência)		
Solos de grão fino (mais de metade dos materiais < 75 micras)	Siltes e argilas com limite de liquidez < 50	Nula a baixa	Rápida a lenta	Nula	ML	Siltes inorgânico e areias muito finas, rocha esmagada, areias finas siltosas ou argilosas com baixa plasticidade
		Média a alta	Nula a muito lenta	Média	CL	Argilas inorgânicas de plasticidade baixa a média, argilas com cascalho, argilas arenosas e argilas siltosas
		Baixa a média	Lenta	Baixa	OL	Siltes orgânicos e argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade
	Siltes e argilas com limite de liquidez > 50	Baixa a média	Lenta a nula	Baixa a média	MH	Siltes inorgânicos, solos siltosos ou arenosos finos micáceos, solos siltosos
		Alta a muito alta	Nula	Alta	CH	Argilas inorgânicas de plasticidade elevada
		Média a alta	Nula a muito lenta	Baixa a média	OH	Argilas orgânicas de plasticidade média a alta
Solos altamente orgânicos		Facilmente identificados pela sua cor, cheiro, sensação esponjosa e textura fibrosa			Pt	Trufa e outros solos altamente orgânicos