



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Daniel da Silva Gomes

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DE  
TERRENOS DE FUNDAÇÃO CALCO-MARGOSOS  
INSTALAÇÃO DE UMA UNIDADE INDUSTRIAL EM COIMBRA**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas  
orientada pelo Professor Doutor Mário de Oliveira Quinta Ferreira e pelo  
Professor Doutor Pedro Gomes Cabral Santarém Andrade apresentada ao  
Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade de Coimbra.**

Setembro de 2023



1 2 9 0



UNIVERSIDADE D  
**COIMBRA**

Daniel da Silva Gomes

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DE  
TERRENOS DE FUNDAÇÃO CALCO-MARGOSOS  
INSTALAÇÃO DE UMA UNIDADE INDUSTRIAL EM COIMBRA**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas  
orientada pelo Professor Doutor Mário de Oliveira Quinta Ferreira e pelo  
Professor Doutor Pedro Gomes Cabral Santarém Andrade apresentada ao  
Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade de Coimbra.**

Setembro de 2023



## **Agradecimentos**

Há algumas pessoas e instituições a quem devo agradecer pois foram fundamentais na presente dissertação, agradecendo pelo seu apoio e disponibilidade ao longo de todo este processo.

Agradecer em primeiro aos meus orientadores, ao Professor Doutor Mário Quinta Ferreira e em especial ao Professor Doutor Pedro Santarém Andrade que teve um contributo fundamental, em particular na parte laboratorial da dissertação.

Ao Laboratório de Geotecnia do Instituto Pedro Nunes (IPN labgeo) pelo estágio disponibilizado e que em conjunto com a empresa de sondagens Gabinete de Serviços Geológicos, Lda (GSG) facultaram as amostras de rochas recolhidas durante a prospeção mecânica e que foram utilizadas na realização desta dissertação. Ao projetista da estrutura, a ECA projetos Lda, e ao dono de obra, a SRAM, agradeço as facilidades concedidas e a autorização para utilizar os elementos do projeto.

Por último, mas certamente o mais importante, agradeço aos meus pais, pois foi todo o apoio que eles me disponibilizaram que me permitiu chegar aqui, sendo os verdadeiros responsáveis por me possibilitarem a ter realizado um percurso universitário.

Um muito obrigado a todos!

## Resumo

A presente Dissertação de Mestrado tem como objetivo a caracterização física e mecânica e o zonamento geotécnico de um terreno de fundação, essencialmente constituído por calcários margosos, e onde se pretende instalar uma unidade industrial de grandes dimensões. Na realização do trabalho foi essencial a utilização da informação e do material obtido através de sondagens mecânicas realizadas para o estudo do terreno de fundação, que se localiza na Zona Industrial da Pedrulha, a Norte da cidade de Coimbra. As sondagens permitiram a elaboração dos logs de sondagem, a realização do zonamento geotécnico e a obtenção de um conjunto de provetes que foram utilizados nos ensaios laboratoriais, de modo a caracterizar física e mecanicamente os materiais rochosos amostrados

O trabalho inicia-se com uma descrição do local, efetuando-se o enquadramento geográfico e geológico. Posteriormente, é efetuada a análise dos logs de sondagem e realizado um zonamento geotécnico apresentado num perfil geotécnico desenhado no software AutoCAD.

Utilizando os tarolos das sondagens foi efetuada a caracterização geotécnica, para o que se procedeu-se à execução de vários ensaios laboratoriais: Ultrassons, Porosidade Aberta, Massa Volúmica Aparente, Martelo de Schmidt, Ensaio de Absorção, Point Load Test e Ensaio de Desgaste em Meio Húmido.

Os resultados dos ensaios são apresentados, discutidos e interpretados, tendo permitido conhecer e entender melhor o comportamento complexo e variável dos calcários margosos, e a sua importância e significado geotécnico.

A caracterização de campo e de laboratório dos materiais rochosos permitiu a aplicação da classificação geomecânica Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989), que analisa vários parâmetros tais como a resistência do material rochoso, o Rock Quality Designation (RQD), o espaçamento, as condições das descontinuidades e a presença da água de modo a classificar a qualidade do maciço rochoso.

Por último, discutem-se os resultados obtidos nas sondagens e nos ensaios laboratoriais e apresentam-se as conclusões do trabalho.

Palavras-chave: caracterização física e mecânica, zonamento geotécnico, calcários margosos, fundações, Coimbra.

## Abstract

The objective of this Master's Dissertation is the physical and mechanical characterization and geotechnical zoning of a foundation land, consisting of marly limestone, and where it is intended to install a large industrial unit. Carrying out the work was essential to the use of information and material obtained through mechanical surveys carried out to study the foundation land, which is in the Pedrulha Industrial Zone, north of the city of Coimbra. The surveys allowed the preparation of survey records, the carrying out of geotechnical zoning and the obtaining of a set of samples that were used in laboratory tests, in order to physically and mechanically characterize the rock materials sampled.

The work begins with a description of the location, providing the geographic and geological framework. Subsequently, the drilling logs were analyzed, and a geotechnical zoning was carried out, presented in a geotechnical profile drawn in AutoCAD software.

Using the drill cores, geotechnical characterization was carried out, so that various laboratory tests could be carried out: Ultrasound, Open Porosity, Apparent Density, Schmidt Hammer, Absorption Test, Point Load Test and Wear Test in Wet Environment.

The results of the tests are presented, planned, and interpreted, with a view to better understanding and understanding the complex and variable behavior of marly limestones, and their importance and geotechnical significance.

The field and laboratory characterization of rock materials allowed the application of the geomechanical classification Rock Mass Rating (RMR) by Bieniawski (1989), which analyzes several parameters such as the strength of the rock material, the Rock Quality Designation (RQD), the spacing, the conditions of the discontinuities and the presence of water in order to classify the quality of the rock mass.

Finally, we discuss the results obtained from surveys and laboratory tests and present the conclusions of the work.

Keywords: physical and mechanical characterization, geotechnical zoning, marly limestone, foundations, Coimbra.

## Índice Geral

Agradecimentos .....	I
Resumo .....	II
Abstract .....	III
Índice de Figuras .....	VI
Índice de Tabelas .....	VIII
Lista de símbolos, siglas e abreviaturas .....	IX
Introdução .....	1
1. Estudo Geológico e Geotécnico para a construção de uma unidade industrial ....	2
1.1. Enquadramento Geográfico .....	2
1.2. Enquadramento geológico .....	3
1.3. História do local .....	7
1.4. Breve descrição do empreendimento .....	8
2. Sondagens Mecânicas .....	9
2.1. Sondagens à rotação .....	9
2.2. Ensaios SPT .....	11
3. Trabalhos de prospeção na área em estudo .....	12
3.1. Ensaios SPT na área em estudo .....	14
4. Análise de resultados das sondagens .....	16
5. Ensaios laboratoriais .....	17
5.1. Ultrassons .....	18
5.2. Massa volúmica e porosidade aberta .....	21
5.3. Ensaio de resistência à carga pontual ou “ <i>Point Load Test</i> ” .....	26
5.4. Ensaio de absorção .....	29
5.5. Martelo de Schmidt .....	31
5.6. Ensaio de desgaste em meio húmido .....	32
5.7. Últimos ensaios .....	35
6. Classificação Mecânica RMR (Rock Mass Rating) .....	37
6.1. Parâmetros .....	39
6.1.1. Resistência à compressão uniaxial e pontual da rocha .....	39
6.1.2. RQD .....	40
6.1.3. Espaçamento das descontinuidades .....	41
6.1.4. Orientação das descontinuidades .....	42
6.1.5. Condições das descontinuidades .....	42

6.1.5.1.	Persistência.....	43
6.1.5.2.	Abertura e preenchimento .....	44
6.1.5.3.	Rugosidade .....	45
6.1.5.4.	Grau de alteração.....	47
6.1.5.5.	Percolação de água .....	47
7.	Resultados.....	49
7.1.	Resultados dos ensaios laboratoriais .....	49
7.1.1.	Amostragem e preparação dos provetes.....	49
7.1.2.	Ensaio de velocidade de propagação das ondas sísmicas (ultrassons) .	50
7.1.3.	Determinação da massa volúmica aparente e porosidade aberta .....	52
7.1.4.	Point Load Test.....	53
7.1.5.	Ensaio de absorção .....	54
7.1.6.	Martelo de Schmidt .....	55
7.1.7.	Ensaio de desgaste me meio húmido.....	56
7.2.	Resultado da Classificação RMR .....	59
7.3.	Resultado do Zonamento Geotécnico .....	61
7.3.1.	Zonas geotécnicas .....	63
7.3.1.1.	Zona geotécnica 3 (ZG3).....	63
7.3.1.2.	Zona geotécnica 2 (ZG2).....	64
7.3.1.3.	Zona geotécnica 1 (ZG1).....	64
8.	Discussão de resultados.....	66
8.1.	Ensaios laboratoriais .....	66
8.2.	Recomendações Geotécnicas .....	73
9.	Conclusões.....	75
	Referências bibliográficas.....	79
	Anexos.....	82
	Anexo I – Resultado dos ensaios de ultrassom.....	83
	Anexo III – Resultado do ensaio de Point Load Test (amostras secas) .....	85
	Anexo IV – Resultado do ensaio de Point Load Test (amostras saturadas) .....	86
	Anexo V – Resultado do ensaio de absorção .....	87
	Anexo VI – Resultado do ensaio do Martelo de Schmidt.....	88
	Anexo VII – Ensaio do Slake Durability Test (teste 1).....	89
	Anexo VIII - Ensaio do Slake Durability Test (teste 2) .....	90

## Índice de Figuras

<b>FIGURA 1</b> LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO DELIMITADA A VERMELHO (GOOGLE EARTH, 2023) ENQUADRADA NO MAPA DE PORTUGAL CONTINENTAL. ....	2
<b>FIGURA 2</b> EXTRATO DA CARTA GEOLÓGICA DE COIMBRA NORTE (SOARES ET AL. (1985)). LOCAL EM ESTUDO DELIMITADO A VERMELHO. ....	4
<b>FIGURA 3</b> TALUDE AFLORANTE NA LOCAL EM ESTUDO. ....	5
<b>FIGURA 4</b> LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO NO ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E TECTÓNICO DA BACIA LUSITANIANA E DE OUTRAS BACIAS DA MARGEM OCIDENTAL IBÉRICA O (ADAPTADO DE KULLBERG, 2000; ALVES, 2005). ....	6
<b>FIGURA 5</b> A) FOTO, DATADA DO INÍCIO DOS ANOS 50, DO ANTIGO MATADOURO MUNICIPAL DE COIMBRA, INFRAESTRUTURA QUE REMONTA À DÉCADA DE 50 DO SÉCULO XX (FERREIRA, B. (2012)). B) IMAGEM ATUAL DE SATÉLITE, RETIRADA DO GOOGLE EARTH. ....	7
<b>FIGURA 6</b> SISTEMA DE PERFURAÇÃO. ....	10
<b>FIGURA 7</b> LOCALIZAÇÃO DOS FUROS DE SONDAGEM NUMA IMAGEM DO GOOGLE EARTH 2023. ....	13
<b>FIGURA 8</b> A) APAFOR - 30D; B) CAROTEIRO T2-76 MM E COM TUBO DE REVESTIMENTO 84/77 MM, POR BAIXO DA LETRA B E AMOSTRADOR SPT EM PRIMEIRO PLANO. ....	13
<b>FIGURA 9</b> VARA COM COROA DE PRISMAS. ....	14
<b>FIGURA 10</b> CAIXAS DE SONDAGEM CORRESPONDENTES ÀS SONDAGENS S4, S5 E S6 RESPECTIVAMENTE. A) ATERRO E ARGILAS; B) ARGILAS CALCÁRIAS; C) CALCÁRIOS MARGOSOS. ....	16
<b>FIGURA 11</b> A) ESTUFA. B) EXSICADOR. ....	18
<b>FIGURA 12</b> PROVETE PREPARADO PARA A REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE ULTRASSONS, DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DAS ONDAS LONGITUDINAIS. ....	19
<b>FIGURA 13</b> MÉTODO DE ACOPLAMENTO DOS TRANSDUTORES AOS PROVETES PARA MEDIÇÃO DAS ONDAS S. ....	20
<b>FIGURA 14</b> ENSAIO DE MASSA VOLÚMICA APARENTE E POROSIDADE ABERTA: PROVETES SUBMETIDOS AO VÁCUO (“1ª FASE” – 4H). À ESQUERDA OS PROVETES DENTRO DO EXSICADOR E À DIREITA A BOMBA. ....	22
<b>FIGURA 15</b> ENSAIO DE MASSA VOLÚMICA APARENTE E POROSIDADE ABERTA: PROVETES SUBMETIDOS AO VÁCUO SUBMERSOS EM ÁGUA (“2ª FASE” – 8H). ....	23
<b>FIGURA 16</b> ENSAIO DE MASSA VOLÚMICA APARENTE E POROSIDADE ABERTA: PROVETES APÓS O TÉRMINO DA “2ª FASE”. ....	23
<b>FIGURA 17</b> ENSAIO DE MASSA VOLÚMICA APARENTE E POROSIDADE ABERTA. A) MASSA SATURADA ( $M_{SAT}$ ), B) MASSA SUBMERSA ( $M_{SUB}$ ). ....	24
<b>FIGURA 18</b> EQUIPAMENTO DE POINT LOAD TEST. ....	26
<b>FIGURA 19</b> ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CARGA PONTUAL: TIPOS DE PROVETES E REQUISITOS DE DIMENSÕES DOS PROVETES (ISRM, 1985). ....	27
<b>FIGURA 20</b> ENSAIO DE RESISTÊNCIA À CARGA PONTUAL: A) ROTURAS VÁLIDAS; B) ROTURAS INVÁLIDAS (ISRM, 1985). ....	27
<b>FIGURA 21</b> A) RECIPIENTE COM ÁGUA; B) AMOSTRAS SUBMERSAS; C) PESAGEM DAS AMOSTRAS SATURADAS. ....	30
<b>FIGURA 22</b> MARTELO DE SCHMIDT: ILUSTRAÇÃO DE UM ENSAIO REALIZADO NUM PROVETE. ....	31
<b>FIGURA 23</b> ÁBACO QUE CORRELACIONA O VALOR DA DUREZA DE SCHMIDT (R), COM A RRCU (DEERE & MILLER (1966) IN HOEK (1981)). ....	32
<b>FIGURA 24</b> SLAKE DURABILITY TEST: A) PROCESSO DE FRAGMENTAÇÃO DO MATERIAL; B) MATERIAL FRAGMENTADO PREPARADO. ....	33
<b>FIGURA 25</b> SLAKE DURABILITY TEST: EQUIPAMENTO. ....	34
<b>FIGURA 26</b> ENSAIO EXPERIMENTAL: PROVETES SUBMERSOS EM ÁGUA POR 24H. A) PRIMEIRO MINUTO; B) 10 MIN DE ENSAIO; C) 1H DE ENSAIO; D) 2H DE ENSAIO; E) 24H DE ENSAIO; F) PROVETES REMEXIDOS (24H DE ENSAIO). ....	36
<b>FIGURA 27</b> EXEMPLO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO NUM TESTEMUNHO DE SONDAGEM. ....	40
<b>FIGURA 28</b> REPRESENTAÇÃO SIMPLES PARA EXEMPLIFICAR A CONTINUIDADE RELATIVA DE VÁRIAS FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES – IMAGEM AUTOCAD. ....	43
<b>FIGURA 29</b> REPRESENTAÇÃO SIMPLES PARA EXEMPLIFICAR A ABERTURA DAS DESCONTINUIDADES – IMAGEM AUTOCAD. A) DESCONTINUIDADE FECHADA; B) DESCONTINUIDADE ABERTA; C) DESCONTINUIDADE PREENCHIDA – IMAGEM AUTOCAD. ....	44
<b>FIGURA 30</b> PERFIS TIPO DE RUGOSIDADE (ISRM, 1981 IN VALLEJO ET AL., 2002). ....	46
<b>FIGURA 31</b> ESQUEMA REPRESENTATIVO DO ACOPLAMENTO DOS TRANSDUTORES. À ESQUERDA DA FIGURA UM TRANSDUTOR ACOPLADO NUMA SUPERFÍCIE PLANA (BOM ACOPLAMENTO); À DIREITA UM TRANSDUTOR ACOPLADO NUMA SUPERFÍCIE COM IRREGULARIDADES (MAU ACOPLAMENTO) – IMAGEM AUTOCAD. ....	51

<b>FIGURA 32</b> RELAÇÃO DE ABSORÇÃO SOBRE O TEMPO.....	54
<b>FIGURA 33</b> RESULTADO DO ENSAIO SLAKE DURABILITY TEST: VALORES DO ÍNDICE DE DURABILIDADE. ....	56
<b>FIGURA 34</b> RESULTADO DO ENSAIO SLAKE DURABILITY TEST – TESTE 2: VALORES DO ÍNDICE DE DURABILIDADE. ....	57
<b>FIGURA 35</b> PERFIL GEOTÉCNICO (SONDAGENS S4, S5 E S6). ....	62
<b>FIGURA 36</b> RELAÇÃO ENTRE $V_P$ E AS $V_S$ CALCÁRIO CINZENTO (SECO). ....	67
<b>FIGURA 37</b> RELAÇÃO ENTRE $V_P$ E AS $V_S$ CALCÁRIO CINZENTO (SECO). ....	67
<b>FIGURA 38</b> RELAÇÃO ENTRE $V_P$ E AS $V_S$ CALCÁRIO CINZENTO (SATURADO). ....	68
<b>FIGURA 39</b> RELAÇÃO ENTRE $V_P$ SATURADAS E AS $V_P$ SECAS (CALCÁRIO AMARELO).....	69
<b>FIGURA 40</b> RELAÇÃO ENTRE A POROSIDADE E A MASSA VOLÚMICA APARENTE (CALCÁRIO CINZENTO).....	69
<b>FIGURA 41</b> RELAÇÃO ENTRE A POROSIDADE E A MASSA VOLÚMICA APARENTE (CALCÁRIO AMARELO). ....	70
<b>FIGURA 42</b> RELAÇÃO ENTRE A POROSIDADE E A $V_P$ (CALCÁRIO AMARELO SECO). ....	70
<b>FIGURA 43</b> RELAÇÃO ENTRE A POROSIDADE E A ABSORÇÃO (CALCÁRIO AMARELO).....	71
<b>FIGURA 44</b> IMAGEM ILUSTRATIVA DO ESTADO DOS PROVETES APÓS EXPOSTOS À ÁGUA. ....	77

## Índice de Tabelas

<b>TABELA 1</b> CORRELAÇÃO ENTRE OS VALORES DO SPT (N) COM A CONSISTÊNCIA DE SOLOS ARGILOSOS, PESO ESPECÍFICO E AS TENSÕES ADMISSÍVEIS, ADAPTADO DE TERZAGHI ET AL., (1996).....	11
<b>TABELA 2</b> DESCRIÇÃO DA LITOLOGIA INTERSETADA PELAS SONDAJENS S4, S5 E S6. ....	15
<b>TABELA 3</b> SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DAS SONDAJENS REALIZADAS.....	15
<b>TABELA 4</b> CLASSIFICAÇÃO DA IAEG (1979) PARA A VELOCIDADE DAS ONDAS LONGITUDINAIS. ....	21
<b>TABELA 5</b> CLASSIFICAÇÃO DOS VALORES DA MASSA VOLÚMICA APARENTE (ADAPTADO IAEG 1979).....	25
<b>TABELA 6</b> CLASSIFICAÇÃO DOS VALORES DA POROSIDADE DE ACORDO COM A IAEG (1979).....	25
<b>TABELA 7</b> CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL ROCHOSO INTACTO, ADAPTADO DE BIENIAWSKI (1979). ....	29
<b>TABELA 8</b> CLASSIFICAÇÃO DE DURABILIDADE DE AUFMUTH (1974) PARA O PRIMEIRO CICLO. ....	34
<b>TABELA 9</b> CLASSIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE DURABILIDADE DE GAMBLE (1971) PARA O SEGUNDO CICLO. ....	35
<b>TABELA 10</b> SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE RMR (ADAPTADO DE BIENIAWSKI (1989)). ....	38
<b>TABELA 11</b> ROCK QUALITY DESIGNATION (RQD) (DEERE & DEERE, 1989). ....	41
<b>TABELA 12</b> CLASSIFICAÇÃO DOS MACIÇOS DE ACORDO COM O ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES (ISRM, 1978, 1981). ....	41
<b>TABELA 13</b> CLASSIFICAÇÃO DA CONTINUIDADE SEGUNDO ISRM (ISRM 1978, 1981). ....	43
<b>TABELA 14</b> CLASSIFICAÇÃO DA ABERTURA DAS DESCONTINUIDADES (ADAPTADO DE ISRM, 1978, 1981). ....	45
<b>TABELA 15</b> CLASSIFICAÇÃO DA RUGOSIDADE DAS DESCONTINUIDADES (ADAPTADO DE ISRM, 1978 E 1981). ....	46
<b>TABELA 16</b> GRAUS DE ALTERAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS CONSIDERADOS PELA ISRM (1981).....	47
<b>TABELA 17</b> SÍNTESE DOS VALORES OBTIDOS NO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ULTRASSOM. ....	51
<b>TABELA 18</b> SÍNTESE DOS VALORES OBTIDOS NO ENSAIO DE MASSA VOLÚMICA APARENTE E DA POROSIDADE ABERTA (CALCÁRIO CINZENTO).....	52
<b>TABELA 19</b> SÍNTESE DOS VALORES OBTIDOS NO ENSAIO DE MASSA VOLÚMICA APARENTE E DA POROSIDADE ABERTA (CALCÁRIO AMARELO). ....	52
<b>TABELA 20</b> SÍNTESE DOS VALORES NO ENSAIO DE POINT LOAD TEST (PROVETES SECOS).....	53
<b>TABELA 21</b> SÍNTESE DOS VALORES OBTIDOS NO ENSAIO POINT LOAD TEST (PROVETES SATURADOS).....	53
<b>TABELA 22</b> SÍNTESE DOS VALORES OBTIDOS NO ENSAIO DE ABSORÇÃO. ....	54
<b>TABELA 23</b> SÍNTESE DOS VALORES OBTIDOS NO ENSAIO DO MARTELO DE SCHMIDT.....	55
<b>TABELA 24</b> SÍNTESE DOS VALORES MÉDIOS OBTIDOS NO ENSAIO DE SLAKE DURABILITY TEST. ....	58
<b>TABELA 25</b> SÍNTESE DOS VALORES MÉDIOS OBTIDOS NO ENSAIO DE SLAKE DURABILITY TEST – TESTE 2 .....	59
<b>TABELA 26</b> SÍNTESE DOS VALORES OBTIDOS NO SISTEMA CLASSIFICATIVO DE RMR – SONDAJEM S4. PARÂMETROS: 1 – RESISTÊNCIA DO MATERIAL ROCHOSO INTACTO (POINT LOAD TEST); 2 - RQD; 3 – ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES; 4 – CONDIÇÕES DAS DESCONTINUIDADES; 5 – PRESENÇA DE ÁGUA. ....	60
<b>TABELA 27</b> SÍNTESE DOS VALORES OBTIDOS NO SISTEMA CLASSIFICATIVO DE RMR – SONDAJEM S5. PARÂMETROS: 1 – RESISTÊNCIA DO MATERIAL ROCHOSO INTACTO (POINT LOAD TEST); 2 - RQD; 3 – ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES; 4 – CONDIÇÕES DAS DESCONTINUIDADES; 5 – PRESENÇA DE ÁGUA. ....	60
<b>TABELA 28</b> SÍNTESE DOS VALORES OBTIDOS NO SISTEMA CLASSIFICATIVO DE RMR – SONDAJEM S6. PARÂMETROS: 1 – RESISTÊNCIA DO MATERIAL ROCHOSO INTACTO (POINT LOAD TEST); 2 - RQD; 3 – ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES; 4 – CONDIÇÕES DAS DESCONTINUIDADES; 5 – PRESENÇA DE ÁGUA. ....	61
<b>TABELA 29.</b> CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO, TENDO EM CONTA A PORCENTAGEM DE RECUPERAÇÃO (DEERE & DEERE, 1989). REC (RECUPERAÇÃO).....	63
<b>TABELA 30.</b> TABELA SÍNTESE. ....	65
<b>TABELA 31</b> TABELA SÍNTESE DOS RESULTADOS MÉDIOS OBTIDOS DOS VÁRIOS ENSAIOS LABORATORIAIS REALIZADOS.....	66
<b>TABELA 32</b> COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DE R OBTIDOS. ....	72

## Lista de símbolos, siglas e abreviaturas

A - Absorção

BGD - Basic Geotechnical Description of Rock Masses

cm – Centímetro

CV – Coeficiente de variação

$D_e$  = Diâmetro equivalente

et al. – et alia (“e outros”)

EN – European norm (norma europeia)

F – Grau de fracturação

$F$  – Fator de correção

g - Grama

GSG - Gabinete de Serviços Geológicos

H -Hora

IAEG - International Association for Engineering Geology and the Environment

$I_d$  - Índice de durabilidade

IPN – Instituto Pedro Nunes

IPQ - Instituto Português da Qualidade

$I_s$  = Índice de carga pontual ou índice de resistência à carga pontual

ISRM - International Society for Rock Mechanics

kHz - Kiloherz

kPa – Quilopascal

km -Quilómetro

kN – Quilonewton

L - Comprimento

l - Litro

Labgeo - Laboratório de Geotecnia

m – Metro

$M_{hum}$  - Massa húmida

mm – Milímetro

MOI - Margem Ocidental Ibérica

MPa - MegaPascal

$M_s$  – Massa seco

$M_{sat}$  – Massa saturado  
 $M_{sub}$  – Massa submerso  
MVA - Massa volúmica aparente  
 $m^3$  – Metro cúbico  
m.s – Metro por segundo  
N – Número de pancadas  
NP – Norma Portuguesa  
 $N_{SPT}$  – Número de pancadas SPT  
P - Porosidade aberta  
 $P$  = carga aplicada no momento de rotura  
 $\rho_w$  – Massa volúmica da água  
R – Dureza de Schmidt  
 $R$  – Coeficiente de correlação  
RCU - Resistência à compressão uniaxial  
Rec – Recuperação  
RMR - Rock Mass Rating  
RQD – Rock Quality Designation  
SIMR - Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas  
SPT – Standart Penetration Test  
 $V_p$  - Ondas longitudinais  
 $V_s$  – Ondas transversais  
W – Grau de alteração  
ZG – Zona Geotécnica  
° - Grau  
°C – Graus Celsius  
% – Percentagem  
> - Maior que  
< - Menor que  
 $\sum i$  – Somatório dos tarolos



## Introdução

A presente Dissertação foi desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas, do Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Os trabalhos foram desenvolvidos no âmbito de um estágio curricular realizado numa colaboração entre a Universidade de Coimbra e o Laboratório de Geotecnia do Instituto Pedro Nunes (IPN labgeo).

O trabalho aborda a realização do estudo geotécnico de um terreno na Zona Industrial da Pedrulha, em Coimbra, onde se pretende construir uma unidade industrial de grandes dimensões. Os trabalhos de prospeção foram realizados pela empresa GSG que em colaboração com o IPN labgeo facultaram as caixas de sondagem com os tarolos resultantes da prospeção mecânica realizada, de modo a ser realizada a caracterização pormenorizada dos tarolos das sondagens.

O presente trabalho está dividido em três partes. A primeira parte consistiu numa pesquisa bibliográfica, tendo como objetivo conhecer o local em estudo. Na segunda parte, relacionada com as sondagens mecânicas procurou-se apresentar os trabalhos de prospeção mecânica realizados na área em estudo e a análise dos respetivos resultados das sondagens. A terceira e última parte é inteiramente dedicada aos ensaios laboratoriais (caracterização física e mecânica dos calcários margosos) e ao zonamento geológico e geotécnico da área de trabalho. São apresentadas as respetivas metodologias, resultados, recomendações, discussão e as suas conclusões.

A última parte da presente dissertação de mestrado têm como finalidade a caracterização geológica e geotécnica do terreno em questão de modo a melhorar o conhecimento do material geológico presente no local. Este conhecimento é de elevada importância permitindo equacionar os problemas da engenharia provocados pela interação das atividades humanas com o meio geológico e, tendo como objetivo, que os fatores geológicos que condicionam as obras de engenharia sejam tidos em conta e interpretados adequadamente, de modo a evitar e minimizar os riscos geológicos (Vallejo et al., 2002).

O zonamento geológico-geotécnico juntamente com os ensaios de laboratório realizados na presente Dissertação complementam-se, procurando tornar o estudo geológico-geotécnico mais fundamentado e mais completo.

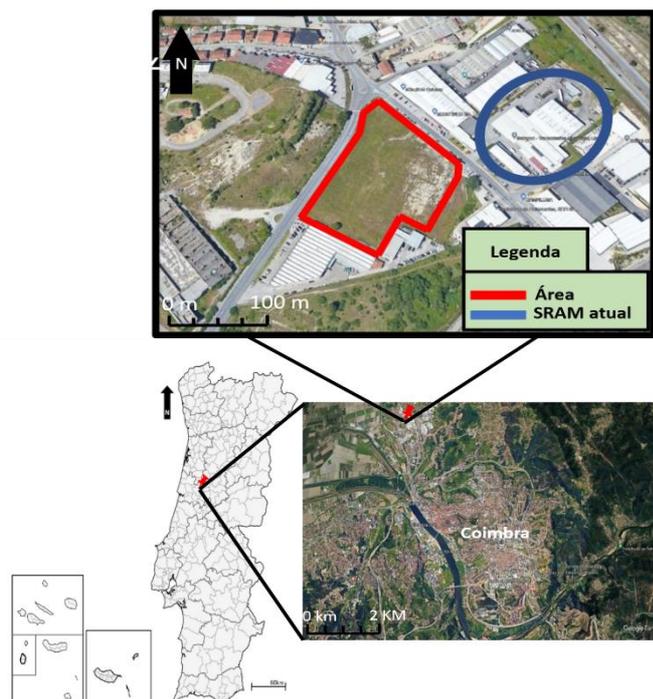
## 1. Estudo Geológico e Geotécnico para a construção de uma unidade industrial

Nesta primeira fase da Dissertação procura-se conhecer o local de estudo a nível geográfico, geológico, hidrogeológico, tectónico e ter conhecimento dos seus antecedentes históricos, ou seja, se na área de estudo já existiu algum tipo de infraestrutura.

### 1.1. Enquadramento Geográfico

A área de estudo localiza-se na Zona Industrial da Pedrulha, na área urbana de Coimbra, no distrito de Coimbra. A Pedrulha situa-se a cerca de 5 km a Noroeste do centro da cidade de Coimbra (Figura 1), na margem direita do Rio Mondego (que nasce na Serra da Estrela, a 1525 m de altitude, e acaba por desaguar no Oceano Atlântico, junto à Figueira da Foz). A cidade de Coimbra detém uma posição privilegiada no centro de Portugal, localizando-se entre as duas principais áreas metropolitanas nacionais, Lisboa e Porto. O município de Coimbra detém uma área de 319,4 km<sup>2</sup>, onde residem 140 816 habitantes (Instituto Nacional de Estatística, 2021) e apresenta uma densidade populacional de 441 habitantes/ km<sup>2</sup>.

De forma mais precisa a área em estudo localiza-se no cruzamento entre a Rua António Sérgio e a Rua Manuel Madeira. As suas coordenadas geográficas são em termos de latitude 40°14'27.7"N e longitude 8°26'32.4"W.



**Figura 1** Localização da área de estudo delimitada a vermelho (Google Earth, 2023) enquadrada no mapa de Portugal continental.

## 1.2. Enquadramento geológico

Em termos geomorfológicos, a área da cidade de Coimbra, caracteriza-se por um possuir uma topografia acidentada, moldada por eventos tectónicos e ações geodinâmicas que tiveram efeito sobre o material geológico da cidade. Na área urbana de Coimbra ocorre o contacto de duas das maiores unidades morfoestruturais de Portugal continental, o Maciço Hespérico e a Orla Mesocenoica ocidental que são atravessadas pelo Rio Mondego e seus afluentes.

O vale do rio Mondego é preenchido por espessas camadas de aluviões, que correspondem a depósitos terrígenos com estruturação interna traduzindo a evolução do seu leito e são o resultado da acumulação de materiais associados à dinâmica fluvial. Estes depósitos aluvionares pertencem ao Quaternário (Holocénico). Na zona da cidade de Coimbra, o vale está assente no firme rochoso constituído por calcários das Camadas de Coimbra, do Jurássico Inferior, arenitos da Formação de Castelo Viegas e pelitos da Formação dos Pereiros, do Triásico Superior. A margem esquerda do rio é caracterizada por calcários das Camadas de Coimbra de natureza dolomítica constituídas por dolomitos e calcários dolomíticos

A área de estudo insere-se na Bacia Lusitânica, esta bacia sedimentar desenvolveu-se na Margem Ocidental Ibérica (MOI) durante parte do Mesozoico, envolvendo uma transição de fácies calco-dolomíticas da Formação de Coimbra para fácies margo-calcárias da Formação de Água de Madeiros (Soares et al., 1993; Duarte & Soares, 2002; Azerêdo et al., 2003; Duarte et al., 2004). A Bacia Lusitânica tem uma área superior a 20 000 km<sup>2</sup> na parte central da MOI, alongando-se por aproximadamente 200 km para NNW-SSE e por mais de 100 km na direção perpendicular. Cerca de 2/3 aflora na área continental emersa e a restante área está imersa na plataforma continental (Kullberg et al., 2006).

O Grupo de Coimbra (Soares et al., 2007) é composto por conjunto de formações essencialmente carbonatadas e dolomíticas de idades compreendidas entre o Sinemuriano e o Carixiano Inferior, com espessura na ordem dos 180 a 220 m. Da base para o topo, compreendem as subunidades Camadas de Coimbra e Camadas de S. Miguel. As primeiras são essencialmente dolomíticas, ao passo que as segundas são predominantemente calcárias. Na base das Camadas de Coimbra s.s. observam-se bancadas espessas de dolomias amarelo-acastanhadas. Para o topo, sucedem-lhes bancadas métricas de calcários dolo-margosos e/ou margosos, de cores claras, esbranquiçadas a acinzentadas. As Camadas de S. Miguel correspondem a calcários e

calcários dolomíticos amarelados com bancadas decimétricas, passando a termos mais margosos para o topo.

Ao Grupo de Coimbra segue-se um conjunto de unidades de calcários margosos e margas em bancadas com espessura variável que, da base para o topo, incluem a Formação de Vale das Fontes, Formação de Lemede e Formação de S. Gião. A Formação de Vale das Fontes (= Margas de Eiras (Soares et al. (1985)), é constituída essencialmente por margas, alternando com calcários margosos. Corresponde à unidade inferior das Margas e Calcários Margosos de Eiras em Soares et al. (1985) e tem uma espessura de cerca de  $40 \pm 10$  m. De acordo com a terminologia utilizada em Soares et al. (1985), às Margas e Calcários Margosos de Eiras sucedem-se as Margas e Calcários Margosos de Pedrulha, com duas sub-unidades Margas e Margo-calcários de Adémia, na base, e Calcários Margosos de Pedrulha, no topo, que são equivalentes às Formações de S. Gião e Póvoa da Lomba, respetivamente (Dinis, 2004).

Em termos Litoestratigráficos, o local insere-se na série Toarciense e Aaleniano, na transição do Jurássico Inferior para o Jurássico Médio na Formação de Margas e Calcários Margosos da Pedrulha, constituindo os Calcários Margosos da Pedrulha tal como se ilustra na Figura 2. Durante o Jurássico Inferior verifica-se uma deposição carbonatada marinha que se mantém na Bacia Lusitânica durante todo o Jurássico Inferior e Médio (ver Soares et al., 1993; Azerêdo et al., 2003), neste tempo geológico materializou-se uma sedimentação fundamentalmente margo-calcária (ver Duarte (1997, 2007); Duarte et al. (2004, 2010)).

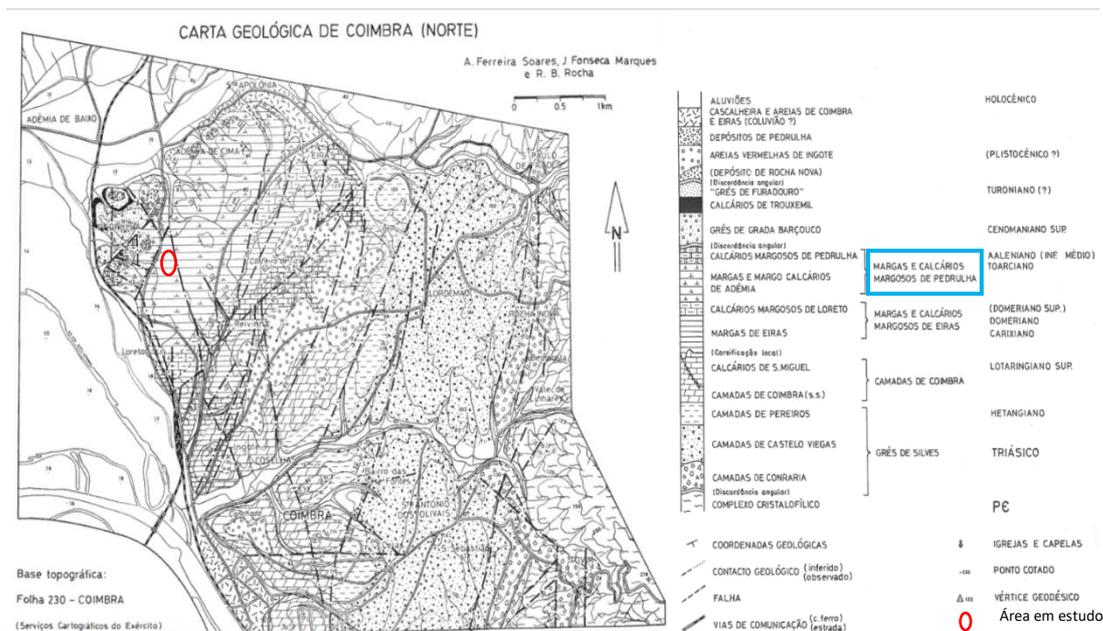
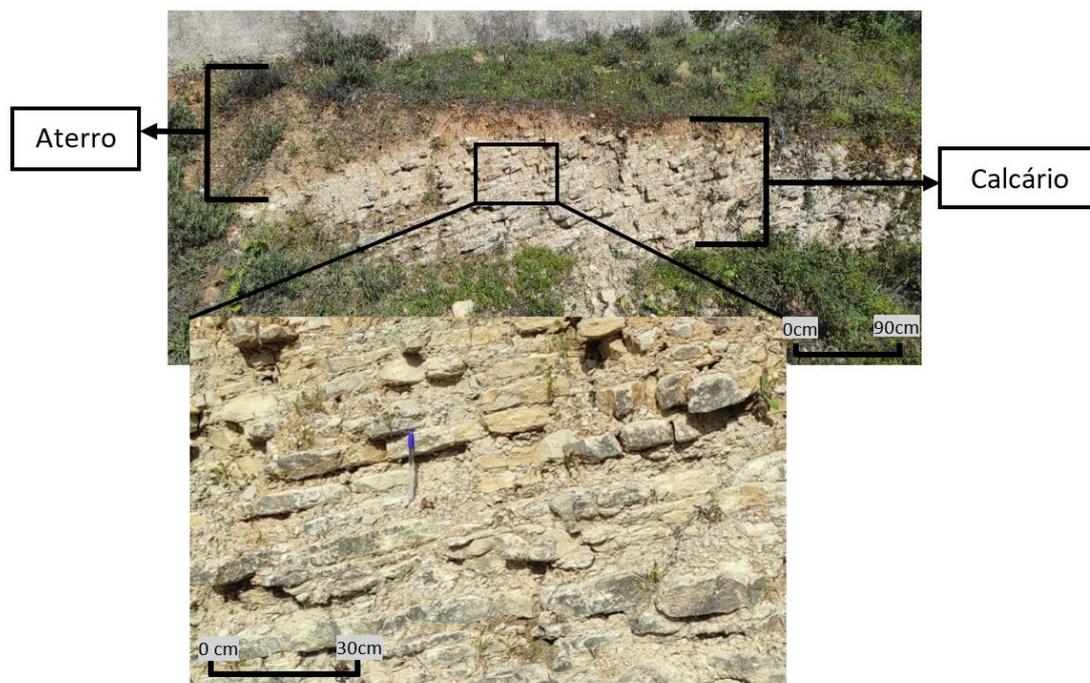


Figura 2 Extrato da carta geológica de Coimbra Norte (Soares et al. (1985)). Local em estudo delimitado a vermelho.

Na carta geológica presente na Figura 2 (Soares et al., 1985) a área de estudo é constituída essencialmente por uma alternância de margas e calcários margosos. Os materiais mais superficiais na área em estudo são aterros e argilas. Em profundidade encontra-se material argilo-calcário transitando para a litologia calco-margosa. Esta litologia apresenta vários níveis de material argiloso na transição argila calcária – calcário margoso, sendo que quanto mais profundidade se atinge, mais extensas são as bancadas de calcário. Este maciço apresenta espessas bancadas calco-margosas que podem atingir algumas dezenas de metros.

No local e através da Figura 3, é possível observar os materiais geológicos ocorrentes na área de estudo, constituída por material de aterro e em profundidade as alternâncias margo-calcárias. As camadas apresentam uma direção N 40° E e um pendor de 22° NW.



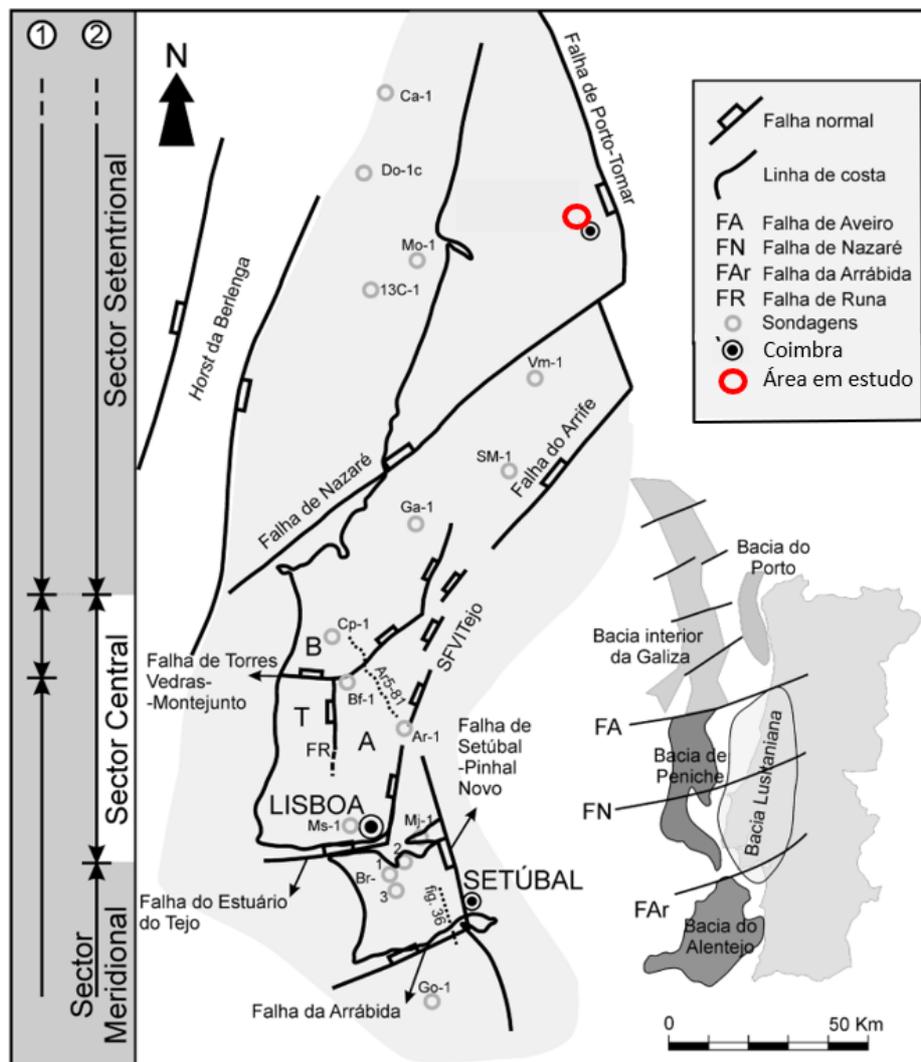
*Figura 3 Talude aflorante na local em estudo.*

Do ponto de vista hidrogeológico a formação de Vale das Fontes (= Margas de Eiras, Soares et al., 1985), detém características, que associadas à sua espessura, conferem ao conjunto de condições para ser considerado como aquífero, ou seja, são rochas capazes de armazenar e transmitir águas subterrâneas, embora a possibilidade de exploração econômica seja inferior à dos aquíferos, uma vez que o material é semipermeável e portanto transmite água a uma taxa muito baixa.

Quanto à tectónica as Camadas de Coimbra encontram-se limitadas por dois grandes acidentes tectónicos (Figura 4), de direção N-S, a falha de Porto-Tomar localizada a Este da zona

em estudo e de direção N 65° E, a falha de Nazaré, a Sul da zona de estudo. A Bacia Lusitânica foi condicionada por falhas formadas durante o episódio de fraturação tardi-varisca, resultando de imposição de regime de cisalhamento direto à micro-placa ibérica nos seus paleolimites ocidental, oriental, setentrional e meridional, (Kullberg *et al.*, 2013) dos quais resultaria um sistema de falhas normais de direções NNE-SSW, NW-SE; NNW-SSE e NE-SW (Soares et al., 1984).

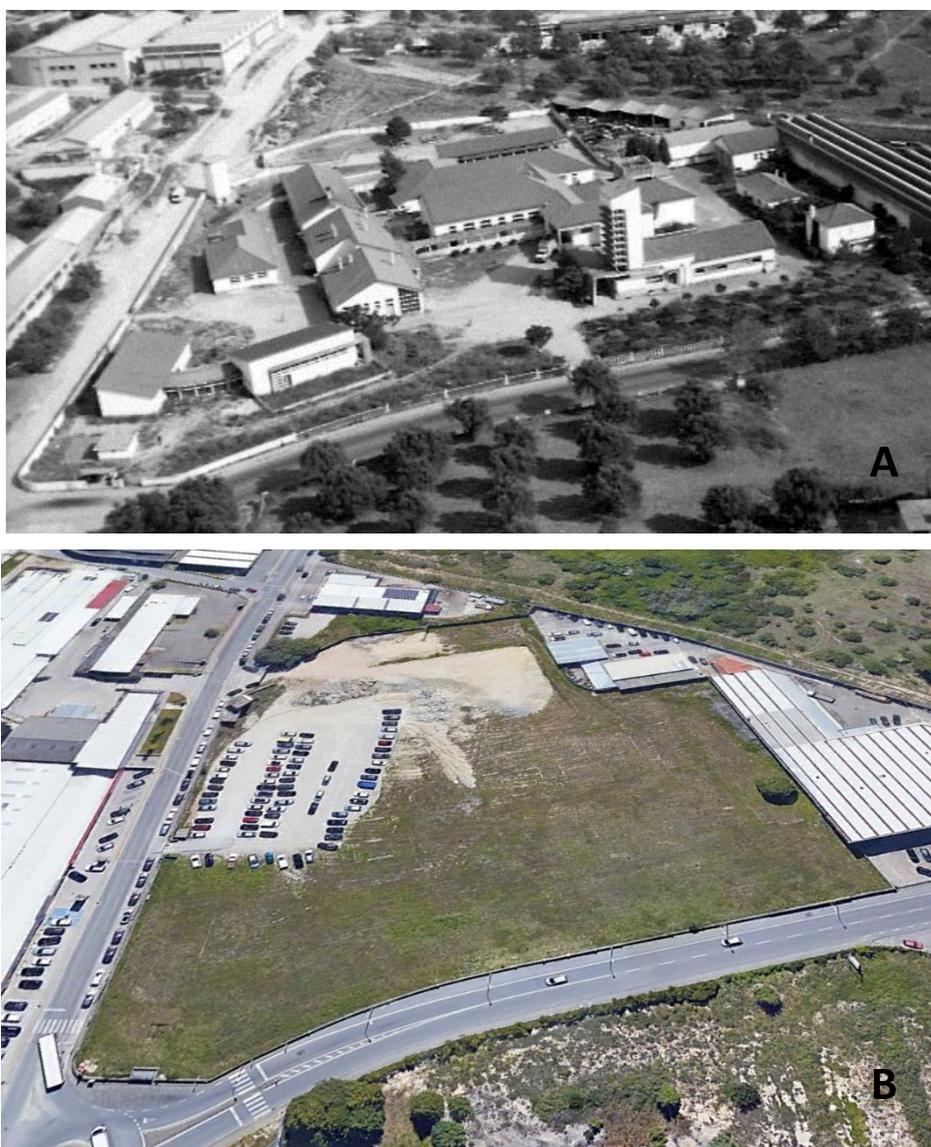
Nas proximidades da área de estudo é possível a presença de uma falha de extensão de vários km, e de orientação, aproximadamente, N-S.



**Figura 4** Localização da área em estudo no enquadramento geográfico e tectónico da Bacia Lusitânica e de outras bacias da Margem Ocidental Ibérica (adaptado de Kullberg, 2000; Alves, 2005).

### 1.3. História do local

O terreno presentemente sem ocupação, corresponde à localização do antigo Matadouro Municipal de Coimbra, infraestrutura que remonta à década de 50 do século XX. Como é possível ver na Figura 5, em que se podem observar a situação atual e a anterior. Este estado histórico pode ter interesse, uma vez que *à priori* é possível inferir que o terreno será viável para a construção de uma nova infraestrutura, dependendo, no entanto, das características da infraestrutura a construir.



**Figura 5** A) Foto, datada do início dos anos 50, do antigo Matadouro Municipal de Coimbra, infraestrutura que remonta à década de 50 do século XX (Ferreira, B. (2012)). B) imagem atual de satélite, retirada do Google Earth.

#### **1.4. Breve descrição do empreendimento**

No local do antigo matadouro de Coimbra pretende-se construir uma unidade industrial de grandes dimensões, para a produção de componentes mecânicos para bicicletas, utilizando tecnologia de ponta, e que irá produzir componentes a serem vendidos no mercado mundial a nível mundial, pois que a empresa proprietária é uma das líderes de mercado neste sector, tem sede nos Estados Unidos e numerosas filiais espalhadas nos vários continentes.

O projeto envolve a construção de um grande edifício de dois pisos e cave, tendo ainda uma zona envolvente de circulação e de jardins.

Numa parte da cave serão instaladas prensas de enorme capacidade e de grande dimensão, que correspondem aos equipamentos mais sensíveis de instalar e que são imprescindíveis para a laboração da fábrica. A maior parte da cave será para o estacionamento de veículos automóveis.

## **2. Sondagens Mecânicas**

No presente capítulo será descrito o plano de prospeção, bem como uma análise aos seus resultados, para a construção de uma unidade industrial. O plano de prospeção procurou adequar-se ao tipo e características dos terrenos e às novas estruturas a construir.

De modo a conhecer e localizar o substrato rochoso presente na área em estudo efetuaram-se sondagens mecânicas à rotação com a realização sistemática de ensaios SPT. Estas sondagens mecânicas permitiram reunir 13 logs de sondagem relativos a 13 furos de sondagem.

### **2.1. Sondagens à rotação**

Nas sondagens à rotação a ferramenta de furação avança por rotação (pode ser destrutiva ou com recuperação contínua de amostra). Nas sondagens de rotação com recuperação contínua de amostra a ferramenta de furação é uma coroa, vulgarmente de metais duros (por exemplo tungsténio) ou com diamantes (nestas, conforme os tipos e finalidade, variam a densidade de diamantes impregnados e a sua granulometria de acordo com o tipo de terreno a furar).

O sistema de perfuração ilustrado na Figura 6 é composto por uma torre de manobra, um conjunto de varas, coroas (diamantadas, carboneto tungsténio, denteadas), amostradores (simples, duplo, triplo), motor, guincho e bomba de injeção de fluído, este último tem como finalidade, simultaneamente, arrefecer as peças de furação e trazer à superfície os respetivos detritos resultantes da furação. Em trabalhos de geotecnia o fluído de circulação é, geralmente, a água. Em alguns casos pode também ser utilizado um aditivo na água de furação, aumentando a sua viscosidade, de modo a sustentar as paredes do furo, evitando que estas colapsem, permitindo ainda um melhor transporte para a superfície dos detritos de furação de maior dimensão.



*Figura 6* Sistema de perfuração.

## 2.2. Ensaios SPT

Os ensaios Standard Penetration Test (SPT) foram inicialmente desenvolvidos por Terzaghi nos anos 40 do século XX, e correspondem a ensaios *in situ* de penetração dinâmica standard, em que se crava no fundo de um furo de sondagem, um amostrador normalizado. A cravação é efetuada com um pilão de 63,5kg de massa, que cai livremente de uma altura de 760 mm sobre um batente, que por sua vez está ligado a um conjunto de varas cuja ponta é um amostrador normalizado. O ensaio é constituído por duas fases: uma primeira na qual, o amostrador é cravado 15 cm e uma segunda fase, na qual penetra mais 30 cm, registando-se, a cada 15 cm, o número de pancadas a que o amostrador é submetido. Em regra, o resultado da 1.ª fase do ensaio corresponde à intersecção de solos remexidos pela perfuração, pelo que é desprezado. O resultado do ensaio resulta então da soma do número de pancadas (N) obtido na 2.ª fase do ensaio (15 cm + 15 cm), ou, sempre que a penetração for inferior a 30 cm, igual ao número de pancadas limite considerado para o ensaio e respetiva penetração no terreno. Este número de pancadas limite é designado de “nega” e corresponde habitualmente ao valor de 60 pancadas.

O valor do SPT (N) obtido pode ser correlacionado com a Tabela 1 que permite determinar características dos solos argilosos, como a sua consistência, o peso específico e a tensão admissível.

**Tabela 1** Correlação entre os valores do SPT (N) com a consistência de solos argilosos, peso específico e as tensões admissíveis, adaptado de Terzaghi et al., (1996).

$N_{SPT}$	Consistência	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Tensão admissível (kPa)
<2	Muito mole	13	<30
2 - 4	Mole	15	25 - 50
4 - 8	Média	17	50 - 100
8 - 15	Dura	19	100- 200
15 - 30	Muito dura	20	200 - 400
>30	Rija	>20	>400

### **3. Trabalhos de prospeção na área em estudo**

No início de fevereiro de 2023 a empresa de sondagens Gabinete de Serviços Geológicos, Lda (GSG), executou trabalhos de prospeção com o objetivo de identificar e caracterizar em termos geológicos e geotécnicos a área em estudo para o projeto de construção de uma unidade industrial.

Foram realizados 13 furos de sondagem mecânica à rotação (Figura 7) com a realização sistemática de ensaios SPT, com a finalidade de reconhecer a litologia da área, através da recolha de amostras, bem como para determinar os valores de N do SPT que estão relacionados com a resistência à penetração e, que posteriormente pode ser correlacionado com outros parâmetros geotécnicos, permitindo igualmente a definição do nível freático, a taxa de recuperação simples e ainda o estado de alteração e fracturação.

O plano de prospeção e a localização das sondagens foram previamente preparados após ser auscultado o projetista da estrutura, tendo-se procurando caracterizar a generalidade da fundação do edifício com cave, mas também em particular a zona de instalação das prensas de grandes dimensões. A unidade industrial apresenta uma zona localizada ao longo dos furos de sondagem S4, S5 e S6 (Figura 7), que será mais profunda, devido à instalação de equipamentos necessários para a laboração da fábrica (prensas de elevada capacidade e de grande dimensão).



Figura 7 Localização dos furos de sondagem numa imagem do Google Earth 2023.

O equipamento utilizado na realização das 13 sondagens é um APAFOR - 30D representado na Figura 8 A), é ilustrado em primeiro plano o amostrador SPT aberto com o caroteiro T2-76 mm e com tubo de revestimento 84/77 mm em segundo plano (Figura 8 B).



Figura 8 A) APAFOR - 30D; B) caroteiro T2-76 mm e com tubo de revestimento 84/77 mm, por baixo da letra B e amostrador SPT em primeiro plano.

No caso em estudo, com a presença de material rochosos de resistência intermédia, como calcários, ou para solos duros, consegue-se um bom avanço com uma coroa de prismas de tungsténio. A ferramenta de furação vai no extremo das varas (hastes metálicas) (Figura 9) que se ligam umas às outras e que permitem no seu interior a circulação de fluídos, que no presente caso é água.



*Figura 9 Vara com coroa de prismas.*

### **3.1. Ensaios SPT na área em estudo**

Procedeu-se à execução de 13 furos de perfuração por rotação, em que também se realizaram ensaios SPT com o objetivo de conhecer a litologia e obter a colheita de amostras deformadas de solo em profundidade e em função do resultado do ensaio, em particular do número de pancadas (N), de modo a determinar empiricamente o comportamento mecânico dos solos. Os furos de sondagem deram-se por concluídos aquando da obtenção de 3 negas consecutivas do ensaio SPT (nega = 60 pancadas) ou quando a profundidade predefinida foi atingida e os resultados das sondagens permitiam esclarecer as condições do maciço que eram consideradas necessárias para o dimensionamento das fundações e escavações. Nos materiais rochosos não se realizou o ensaio SPT, pois é um ensaio específico para solos.

Com os resultados obtidos foi possível delimitar diferentes zonas litológicas e caracterizá-las de acordo com a Tabela 2. Os terrenos em estudo têm características argilosas, margosas e calco-margosas, podendo os ensaios SPT classificar as componentes argilosas e margosas de acordo com a sua consistência (Tabela 1).

*Tabela 2 Descrição da Litologia intersetada pelas sondagens S4, S5 e S6.*

Litologia	S4 (m)	S5 (m)	S6 (m)	Descrição
Aterro/Argila	0 - 1,8	0 - 0,7	0 - 1,8	Material de aterro, argila de cor castanha
Argila e marga calcária	1,8 - 3	0,7 - 2,7	1,8 - 2,6	Argila e marga calcária de cor bege
Calcário margoso	3 - 15	2,7 - 15	2,6 - 15	Calcário de cor bege e acinzentada por vezes com pequenos níveis argilosos

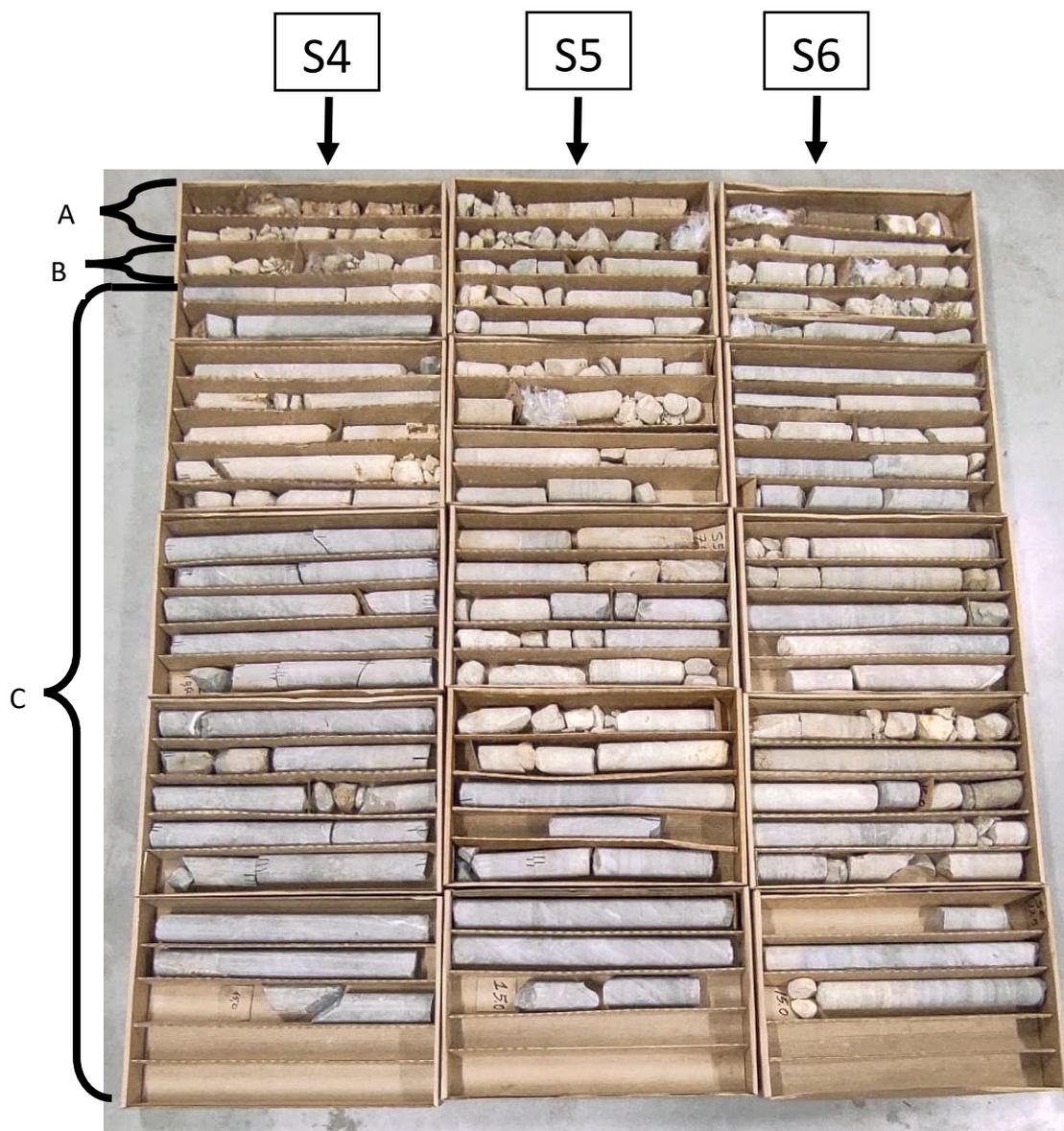
A Tabela 3 é uma tabela síntese das características das sondagens realizadas, onde é possível conhecer a cota aproximada da boca do furo, a profundidade alcançada do furo, o número de ensaios SPT e a profundidade do nível freático.

*Tabela 3 Síntese das características das sondagens realizadas.*

Designação do furo de sondagem	Cota aproximada da boca do furo (m)	Profundidade alcançada do furo (m)	Nº de ensaios SPT	Profundidade da água (m)
S1	48	6	2	2,6
S2	48	6	2	2,8
S3	49	6	3	3,9
<b>S4</b>	<b>48</b>	<b>15</b>	<b>2</b>	<b>6,1</b>
<b>S5</b>	<b>48</b>	<b>15</b>	<b>2</b>	<b>11,8</b>
<b>S6</b>	<b>48</b>	<b>15</b>	<b>3</b>	<b>2,5</b>
S7	48	6	3	2
S8	48	6	3	4,7
S9	49	6	2	2,4
S10	49	6	2	3,5
S11	50	6	1	2
S12	50	6	4	2,8
S13	50	6	1	3,2

#### 4. Análise de resultados das sondagens

O material recolhido apresenta alguma similaridade de sondagem para sondagem, na camada superficial do terreno, até uma profundidade média de 2 m, correspondendo a (A) na Figura 10, encontra-se material de aterro e argilas com transição para argilas calcárias até uma profundidade média de 3 m, correspondendo a (B) na Figura 10, em profundidade após esta litologia encontram-se calcários margosos, neste caso correspondendo a (C) na Figura 10.



**Figura 10** Caixas de sondagem correspondentes às sondagens S4, S5 e S6 respetivamente. A) Aterro e argilas; B) Argilas calcárias; C) Calcários margosos.

## 5. Ensaios laboratoriais

Os ensaios laboratoriais na geotecnia são fundamentais para a compreensão das propriedades dos solos e rochas, permitindo uma abordagem científica e precisa na concepção e execução de projetos de engenharia civil, contribuindo para a segurança, sustentabilidade e eficiência das obras e infraestruturas.

No presente Capítulo serão abordados de forma detalhada todos os ensaios realizados em laboratório. Os ensaios seguiram uma ordem, tendo o cuidado de realizar os ensaios não destrutivos em primeiro lugar e só após foram realizados os ensaios destrutivos.

Foram selecionados sete diferentes tipos de ensaios a realizar: Ensaio de Ultrassons, Porosidade Aberta, Massa Volúmica Aparente, Martelo de Schmidt, Ensaio de Absorção de Água, Point Load Test e ensaio de Desgaste em Meio Húmido. Esta seleção teve em conta a pertinência dos ensaios em relação às características do material e do estudo que se pretende efetuar.

O Rock Quality Designation (RQD) e a classificação Rock Mass Rating (RMR) foram utilizados de modo a poder avaliar a qualidade e a integridade de um maciço rochoso, bem como para definir as condições do maciço rochoso em relação à sua capacidade de suportar cargas ou de se realizarem escavações estáveis.

## 5.1. Ultrassons

Os ensaios de ultrassons são uma técnica não destrutiva de grande utilização na avaliação da integridade estrutural de materiais.

Estes ensaios envolvem a geração de ondas sonoras de alta frequência, geralmente acima de 20 kHz, conhecidas como ondas ultrassónicas, e a análise das ondas refletidas ou transmitidas através do material que se pretende testar. O equipamento usado para realizar esses ensaios foi o *Pundit Lab (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester)* da *Proceq*. O princípio básico dos ensaios dos ultrassons é o envio de pulsos ultrassónicos para o material a testar e a medição do tempo que levam para serem detetados após a reflexão ou transmissão em interfaces internas ou superfícies do material (El-Gohary, 2012). Com base no tempo de viagem e outras informações, é possível determinar propriedades importantes do material como a Velocidade das ondas P e S, a deteção de descontinuidades e avaliar a qualidade do material (Proceq, n.d.).

No início do ensaio foram efetuados os procedimentos de calibração recomendados pelo fabricante do equipamento, que envolveram a utilização de um provete padrão. No presente trabalho foram realizados ensaios de contacto para transmissão das ondas longitudinais ( $V_p$ ) e transversais ( $V_s$ ) em provetes. O material foi testado em 2 condições distintas: seco e saturado. Provetes de forma cilíndrica foram previamente obtidos após o corte num equipamento de serra eléctrica e foram colocados numa estufa durante 24 horas a uma temperatura de 60°C (Figura 11 A), após isto foram colocados por uns minutos num exsicador com sílica (Figura 11 B) com o objetivo de arrefecerem sem incremento do teor humidade. Posteriormente, foram pesados, podendo em seguida proceder-se ao início do ensaio dos ultrassons. Estes foram realizados de acordo com os procedimentos definidos pela norma EN 14579 (IPQ, 2007).

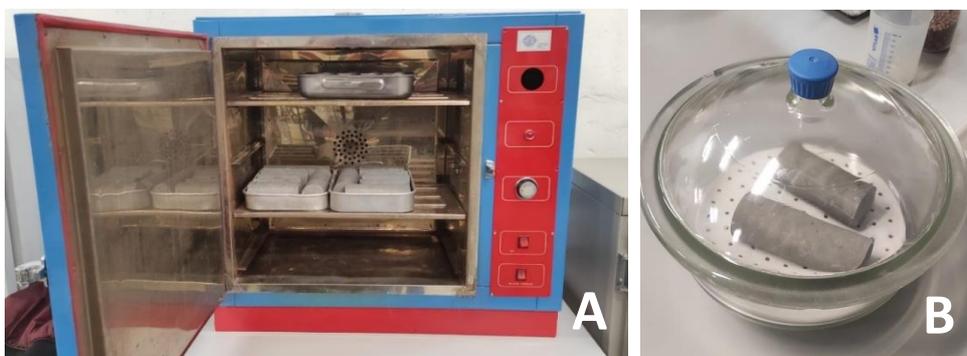


Figura 11 A) Estufa. B) exsicador.

Nos ensaios de ultrassons com os provetes, estes foram colocados sobre uma calha de modo a manter uma disposição fixa e horizontal, após isto, os transdutores foram acoplados aos provetes com o auxílio de vaselina para a medição das ondas P (Figura 12) (utilização de transdutores de 24 kHz), e de um gel para a medição das ondas S (utilização de transdutores 250 kHz).

No final dos ensaios com os provetes secos, estes foram encaminhados para a realização dos ensaios de massa volúmica e porosidade aberta, aproveitando assim este conjunto de ensaios que iriam saturar os provetes, e possibilitando a sua utilização para os ensaios de ultrassons com os provetes saturados.



*Figura 12* Provete preparado para a realização do ensaio de Ultrassons, determinação da velocidade das ondas longitudinais.

Deve mencionar-se a existência de problemas na fase de acoplamento dos provetes, o que por sua vez se traduziu no registo de alguns resultados, designadamente na realização dos ensaios de determinação das velocidades das ondas S que foram de interpretação mais difícil. A Figura 13 ilustra o método utilizado de modo a conseguir acoplar os transdutores aos provetes de modo a determinar as velocidades das ondas transversais.



Figura 13 Método de acoplamento dos transdutores aos provetes para medição das Ondas S.

Nos ensaios dos ultrassons foram utilizados 34 provetes secos para as diferentes medições, enquanto para o material saturado em água utilizaram-se 23 provetes.

Na Tabela 4 é indicada a classificação definida pela IAEG (1979) para a velocidade das ondas longitudinais, que pode ser utilizada para classificar os resultados obtidos nos ensaios efetuados.

*Tabela 4 Classificação da IAEG (1979) para a velocidade das ondas longitudinais.*

<b>Velocidade dos ultrassons</b>	<b>Descrição (m.s<sup>-1</sup>)</b>
Muito baixa	<2500
Baixa	2500 - 3500
Média	3500 - 4000
Elevada	4000-4500
Muito elevada	>4500

## **5.2. Massa volúmica e porosidade aberta**

Os resultados dos ensaios de massa volúmica e porosidade aberta desempenham um papel crucial na caracterização e compreensão das propriedades físicas das rochas. Estes ensaios fornecem informações valiosas sobre a estrutura interna das rochas, da sua capacidade de armazenamento de fluidos e da sua resistência mecânica.

A massa volúmica é uma medida da densidade da rocha, que indica a quantidade de massa presente em um determinado volume. Esse ensaio permite determinar o peso específico do material rochoso. Além disso, a massa volúmica está diretamente relacionada com a porosidade da rocha, uma vez que os espaços vazios dentro dela contribuem para a diminuição da sua massa volúmica (Ahmed, 1946).

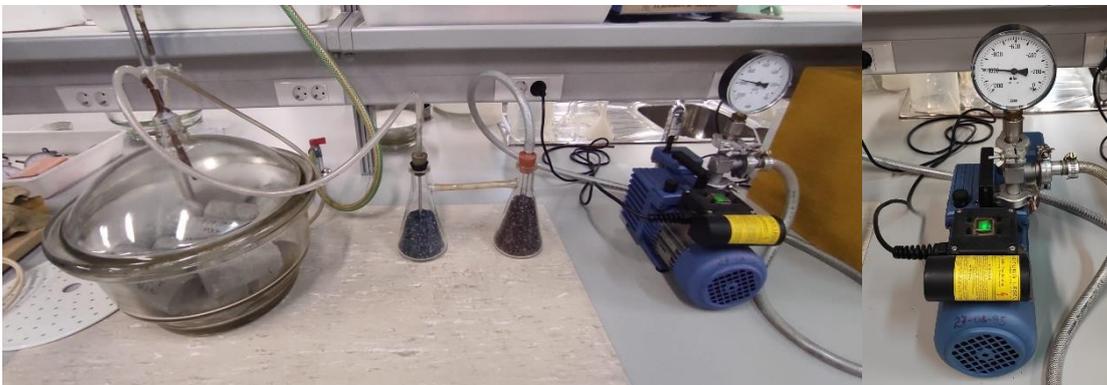
A porosidade aberta é uma medida da quantidade de espaço vazio ou poros presentes numa rocha, expressa como uma percentagem do volume total do material rochoso. Os poros podem ser preenchidos com fluidos, como água ou hidrocarbonetos, ou podem estar vazios. A porosidade aberta é um parâmetro fundamental para determinar a capacidade de armazenamento e a permeabilidade de fluidos numa rocha. Além disso, a porosidade aberta

está diretamente relacionada à resistência mecânica das rochas. Uma porosidade aberta de valores elevados indica, de modo geral, uma menor coesão e uma resistência à compressão do material rochoso mais reduzido. Essa informação é importante em estudos geotécnicos, como os relacionados com fundações de estruturas e estabilidade de taludes, onde a resistência da rocha é um fator crítico.

Em suma, os ensaios de massa volúmica e porosidade aberta em rochas são fundamentais para compreender a sua estrutura, propriedades físicas e comportamento mecânico.

A massa volúmica aparente e a porosidade aberta do material rochoso no presente trabalho foram determinadas de acordo com uma adaptação da norma NP EN 1936 (2008). O procedimento utilizado para a realização do ensaio de porosidade aberta foi o seguinte:

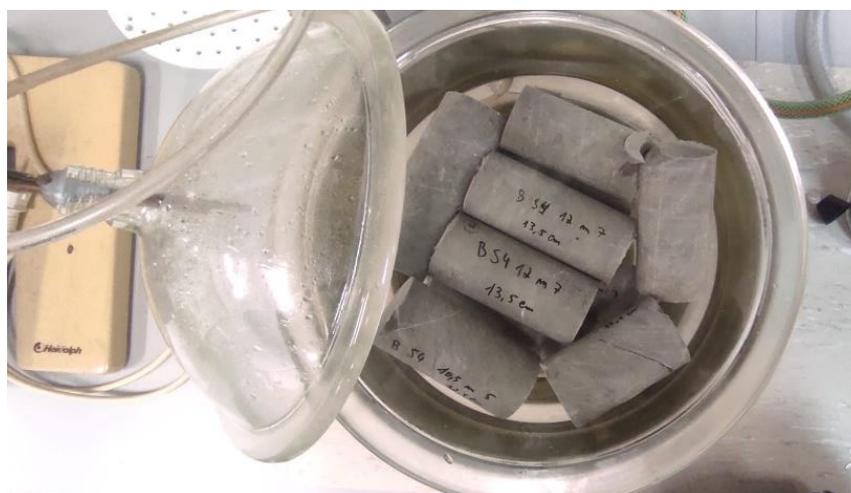
Os provetes provenientes do ensaio de ultrassons, já pesados secos ( $M_s$ ), são submetidos ao vácuo num recipiente (exsicador), este processo incluiu duas fases, totalizando um período temporal de 24 horas. Na primeira fase (as primeiras quatro horas), os provetes foram submetidos ao vácuo (Figura 14) com o objetivo de retirar todo o ar presente nos poros do material, na segunda fase (as quatro horas seguintes) os provetes foram submersos lentamente, durante 10 a 15 minutos, em água ainda sobre o efeito de pressão (Figura 15). Após a segunda fase, os provetes ainda submersos, deixaram de ser sujeitos ao vácuo, ficando submetidos à pressão atmosférica normal durante, aproximadamente, 16 horas (Figura 16), seguidamente os provetes foram pesados em duas condições distintas, na primeira, retiraram-se os provetes do exsicador e utilizou-se um pano húmido para retirar o excesso de água, de modo, a pesar o provete e obter a sua massa saturada ( $M_{sat}$ ) (Figura 17 A), e de seguida obteve-se a sua massa submersa ( $M_{sub}$ ) (Figura 17 B).



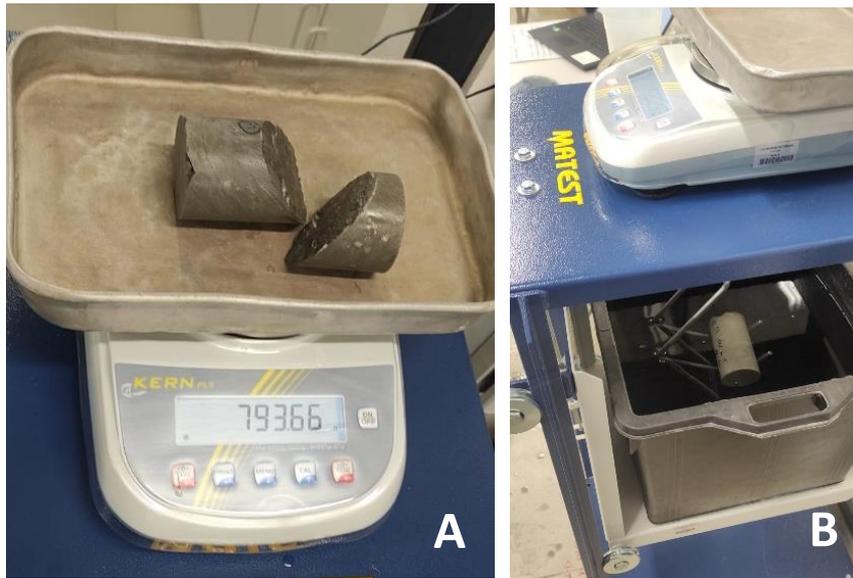
**Figura 14** Ensaio de massa volúmica aparente e porosidade aberta: provetes submetidos ao vácuo (“1ª fase” – 4h). À esquerda os provetes dentro do exsicador e à direita a bomba.



**Figura 15** Ensaio de massa volúmica aparente e porosidade aberta: provetes submetidos ao vácuo submersos em água ("2ª fase" – 8h).



**Figura 16** Ensaio de massa volúmica aparente e porosidade aberta: provetes após o término da "2ª fase".



**Figura 17** Ensaio de massa volúmica aparente e porosidade aberta. A) massa saturada ( $M_{sat}$ ), B) massa submersa ( $M_{sub}$ ).

A determinação da massa volúmica aparente em ( $N.m^{-3}$ ) deve ser efetuado a partir da expressão da Equação 1:

$$MVA = \frac{M_s}{(M_{sat} - M_{sub})} \times \rho_w \quad (\text{eq. 1})$$

Onde:

MVA - massa volúmica aparente;

$\rho_w$  – massa volúmica da água ( $998 \text{ kg.m}^{-3}$ )

$M_{sat}$  - massa da amostra saturada (g);

$M_s$  - massa da amostra seca (g);

$M_{sub}$  - massa da amostra saturada submersa (g).

O cálculo da porosidade aberta é obtido a partir da seguinte expressão da Equação 2:

$$P = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_{sub}} \times 100 (\%) \quad (\text{eq. 2})$$

Onde:

P - Porosidade aberta (%);

$M_{sat}$  - massa da amostra saturada (g);

$M_s$  - massa da amostra seca (g);

$M_{sub}$  - massa da amostra saturada imersa (g).

Nas Tabelas 5 e 6 pode observar-se, respetivamente, as classificações dos valores da massa volúmica aparente e da porosidade segundo a IAEG (1979):

**Tabela 5** Classificação dos valores da massa volúmica aparente (adaptado IAEG 1979).

Massa volúmica aparente seca (kg.m <sup>-3</sup> )	Descrição	Classe
< 1835	Muito baixa	1
1835 - 2243	Baixa	2
2243 - 2599	Média	3
2599 - 2803	Elevada	4
> 2803	Muito elevada	5

**Tabela 6** Classificação dos valores da porosidade de acordo com a IAEG (1979).

Porosidade (%)	Descrição	Classe
> 30	Muito elevada	1
15 - 30	Elevada	2
5 - 15	Média	3
1 - 5	Baixa	4
< 1	Muito baixa	5

### 5.3. Ensaio de resistência à carga pontual ou “*Point Load Test*”

No ensaio de “*Point Load Test*” provoca-se a rotura do material rochoso com o principal objetivo de determinar a sua resistência. São ensaios relativamente expeditos e que também podem ser realizados “*in situ*”, na presente dissertação os ensaios de resistência à carga pontual foram executados em laboratório.

Na Figura 18 encontra-se o equipamento de *Point Load Test*, constituído por uma pequena bomba hidráulica que acionada por uma haste desloca duas ponteiros cónicas que submetem uma força crescente de compressão pontual ao provete até à rotura do mesmo. Após isto, o valor obtido é registado através de leitura no manómetro analógico presente no aparelho.



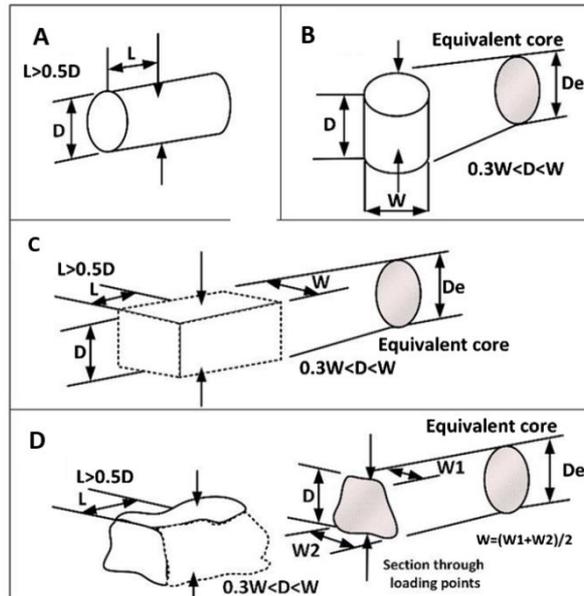
*Figura 18* Equipamento de *Point Load Test*.

Antes da realização dos ensaios de *Point Load Test* é necessário verificar se as relações entre as dimensões do provete estão de acordo com as recomendações da ISRM (1985) (Figura 19 A).

É importante salientar que o teste de carga pontual é um ensaio destrutivo, pois a amostra de rocha é levada à rotura durante o teste, portanto, é necessário realizar múltiplas medições em diferentes amostras para obter resultados representativos.

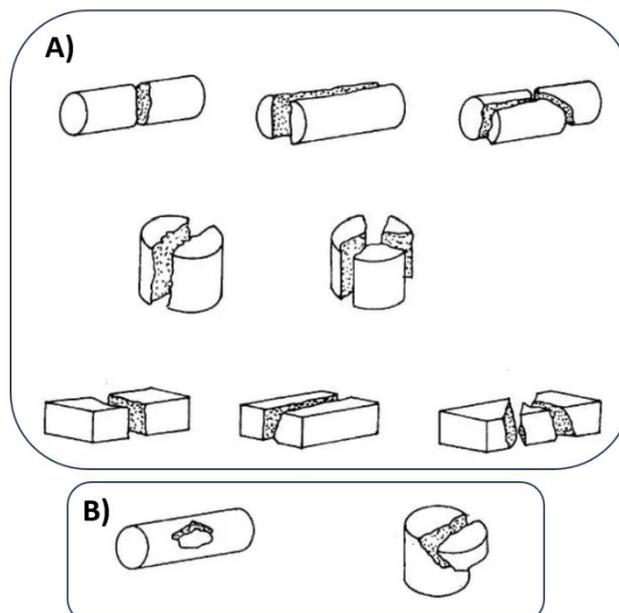
Os provetes utilizados correspondem a cilindros, no entanto, segundo as recomendações da ISRM (1985), os provetes podem apresentar outras formas que não cilíndricas, sendo possível a realização de ensaios com provetes que apresentem forma

paralelepipedal ou irregular desde que os provetes obedeam às relações entre as dimensões representadas Figura 19.



**Figura 19** Ensaio de resistência à carga pontual: Tipos de provetes e requisitos de dimensões dos provetes (ISRM, 1985).

Para que os ensaios de resistência à carga pontual sejam considerados válidos, os provetes testados têm de apresentar uma superfície rotura que passe nos pontos onde a carga foi aplicada, conforme ilustrado na Figura 20.



**Figura 20** Ensaio de resistência à carga pontual: A) Roturas válidas; B) Roturas inválidas (ISRM, 1985).

Como já referido anteriormente os provetes utilizados nos ensaios efetuados, correspondem a cilíndricos. Seguindo a norma (ISRM, 1985) utilizada na presente dissertação para determinar o índice de resistência à carga pontual ( $I_s$ ) os resultados do ensaio são determinados pela expressão da Equação 3:

$$I_s = \frac{P}{De^2} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

$I_s$  = índice de carga pontual ou índice de resistência à carga pontual;

$P$  = carga aplicada no momento de rotura;

$De$  = diâmetro equivalente ( $De = \sqrt{4A/\pi}$ , sendo  $A$ , a área da menor secção que passa pelas ponteiros)

No caso em estudo foi necessário efetuar uma correção uma vez que, segundo os métodos sugeridos pela ISRM (1985), os provetes cilíndricos têm de ter um diâmetro de 50 mm, o que nas amostras ensaiadas não se verifica, deste modo foi necessário aplicar um fator de correção ao valor da resistência à carga pontual corrigida para um diâmetro de 50 mm ( $I_{s(50)}$ ). O valor do fator de correção ( $F$ ) é determinado através da expressão da Equação 4:

$$F = \left(\frac{De}{50}\right)^{0,45} \quad (\text{Eq. 4})$$

A partir dos valores de  $I_s$  e o  $F$ , é possível calcular o  $I_{s(50)}$  que é obtido pela expressão da Equação 5:

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s \quad (\text{Eq. 5})$$

O valor de  $I_{s(50)}$  pode ser correlacionado com a resistência à compressão uniaxial do material rochoso, quanto maior o valor  $I_{s(50)}$  maior a resistência da rocha.

Para determinar a média de  $I_{s(50)}$  para cada tipo de material rochoso é necessário excluir aos valores validos obtidos 4 valores, os dois mais elevados e os dois mais baixos. De notar que em alguns provetes não foi possível realizar o ensaio, uma vez que o material rochoso já tinha sofrido deteriorações na realização dos ensaios anteriores.

O resultado final obtido pode ser correlacionado com o valor da resistência à compressão uniaxial (RCU) através duma relação linear proposta por Bieniawski (1979) (Tabela 7). Através do apresentado na Tabela 7, e com base nos valores obtidos é possível obter uma estimativa do valor da RCU, e ainda classificar o material rochoso, numa classificação que varia desde material extremamente brando a extremamente duro.

*Tabela 7 Classificação do material rochoso intacto, adaptado de Bieniawski (1979).*

CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL ROCHOSO INTACTO		
Resistência a Compressão Uniaxial (MPa)	Descrição	Resistência à Carga Pontual $I_{s(50)}$ (MPa)
0-1	Extremamente branda	-
1-5	Muito branda -	-
5-25	Branda	<1
25-50	Moderada	1 – 2
50-100	Elevada	2 – 4
100-250	Muito elevada	4 – 10
>250	Extremamente elevada	>10

#### 5.4. Ensaio de absorção

O ensaio de absorção é um procedimento utilizado para medir a capacidade de uma rocha ou material poroso em absorver água. É um ensaio importante na caracterização de rochas e materiais de construção, pois fornece informações sobre sua porosidade e permeabilidade.

Para a realização deste ensaio, utilizaram-se amostras provenientes dos ensaios anteriormente mencionados, como o ensaio de Point Load Test. Para este ensaio seguiram-se as recomendações da ISRM (1981) e procedeu-se a uma adaptação da Norma Europeia EN 13755 (2001). O primeiro passo passou pela determinação das massas das amostras (secas), que servirá como base de referência para calcular a absorção de água. Posteriormente, as amostras são colocadas num recipiente e submersas em água durante um período de tempo determinado, no caso em estudo, 1h, 2h, 24 e 48h (Figura 21 B). A cada período temporal, a amostra é retirada do recipiente, e com o auxílio de um pano húmido, enxugada de forma

cuidadosa para retirar o excesso de água superficial. Após este processo procede-se à determinação da massa (Figura 21 C).

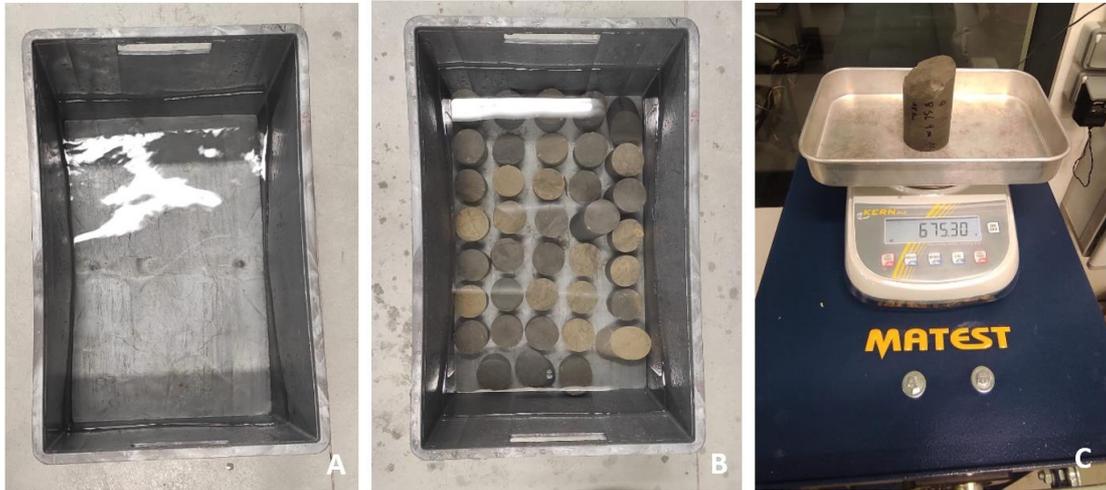


Figura 21 A) recipiente com água; B) amostras submersas; C) pesagem das amostras saturadas.

A absorção da água é expressa como uma percentagem da diferença entre a massa após a submersão (húmida) e a massa inicial (seca) em relação à massa inicial, de acordo com a expressão da Equação 6:

$$A = \frac{(M_{hum} - M_{sec})}{M_{sec}} \times 100 \quad (\text{eq. 6})$$

Onde:

A - Absorção (%)

$M_{sec}$  - Massa seca

$M_{hum}$  - Massa húmida

## 5.5. Martelo de Schmidt

Os resultados do ensaio do martelo de Schmidt permitem definir de forma aproximada a resistência à compressão simples do material rochoso. Este ensaio permite determinações “in situ” ou em laboratório, na presente dissertação realizaram-se os ensaios em laboratório. Este ensaio é considerado não destrutivo, no entanto, devido às características do material rochoso testado verificaram-se algumas dificuldades em cumprir este pressuposto.

Os valores do ensaio são expressos pela dureza de Schmidt (R) e variam entre 0 e 100. Quanto mais dura e compacta for a superfície do material a analisar, maior será o valor de R. Para a realização de ensaio foi necessário assegurar uma base estável para colocar e fixar os provetes (Figura 22), aos quais foram realizadas 10 medições com o martelo de Schmidt numa orientação vertical, e perpendicular às superfícies dos provetes. Estas medições localizaram-se sempre que possível na parte mais central dos provetes. Dos valores obtidos apenas metade é considerada, sendo que a outra metade correspondente aos valores mais reduzidos é desprezada. Sendo assim, a partir dos valores mais elevados determina-se o seu valor médio, o que está de acordo com as indicações da ISRM (1981).



*Figura 22* Martelo de Schmidt: ilustração de um ensaio realizado num provete.

Os valores obtidos de R permitem obter uma estimativa da RCU, esta pode determinar-se através do ábaco de Deere & Miller (1966) que se apresenta na Figura 23, em que se

consideram os valores de  $R$ , a massa volúmica do material rochoso testado, considerando igualmente a orientação do martelo de Schmidt.

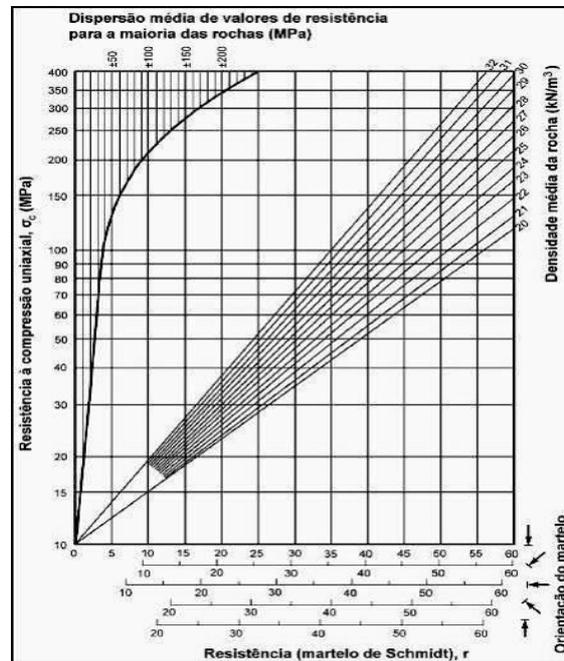


Figura 23 Ábaco que correlaciona o valor da dureza de Schmidt ( $R$ ), com a  $rRCU$  (Deere & Miller (1966) in Hoek (1981)).

De acordo com as sugestões do ISRM (1981), seria necessário proceder a 20 medições para cada provete, no entanto, dado que o material rochoso quando submetido ao impacto do martelo de Schmidt se fractura muitas vezes, optou-se por considerar somente 10 medições.

## 5.6. Ensaio de desgaste em meio húmido

O ensaio de desgaste em meio húmido ou "*Slake Durability Test*" é utilizado para definir a capacidade do material rochoso para resistir à desintegração ou degradação quando exposto à água. Foi desenvolvido por Franklin & Chandra (1972).

A durabilidade no ensaio de desgaste em meio húmido é definida através de testes laboratoriais, nos quais se submetem as amostras de rochas a ciclos de humedecimento e secagem, definindo-se as mudanças através das variações de massa que se verificam.

O teste de durabilidade de decomposição fornece informações valiosas sobre o potencial de meteorização ou de degradação de rochas em condições húmidas, auxiliando assim na avaliação da estabilidade e durabilidade de longo prazo de materiais utilizados em diversas aplicações, como construção de estradas, fundações de edifícios, construção de barragens.

O ensaio de Slake Durability foi efetuado de acordo com as recomendações da ISRM (1981), no qual se procedeu à preparação do material rochoso a ensaiar, material esse composto por porções com uma massa compreendida entre 40 a 60 g, contabilizando um total de 10 porções. Foi necessário recorrer ao uso de um martelo de modo a provocar a fragmentação do material rochoso (Figura 24 A), e obter a massa indicada (Figura 24 B). Após este processo de fragmentação, o material é introduzido numa estufa a uma temperatura de 110°C, na qual permanecerá por 24h. No fim da secagem na estufa, a massa do material é determinada. Posto isto, as amostras encontram-se preparadas para a realização do ensaio.



*Figura 24 Slake Durability Test: A) processo de fragmentação do material; B) material fragmentado preparado.*

O equipamento utilizado no ensaio de desgaste em meio húmido é constituído por dois tambores que são incorporados no aparelho, cada tambor possui um diâmetro de 140 mm e são constituídos por uma malha com abertura de 2,0 mm (Figura 25).

As porções rochosas são colocadas nesses tambores, dividindo as 10 porções de material rochoso pelos 2 tambores. Cada tambor é colocado dentro de um recipiente, ao qual é adicionado uma determinada quantidade de água estabelecida por uma marcação que se encontra assinalada em cada um dos recipientes, ficando as amostras submersas parcialmente, e sujeitas a um primeiro ciclo de humedecimento com duração de 10 minutos. No fim deste

período, as amostras são retiradas dos tambores e voltam de novo à estufa a uma temperatura de 110°C. Após isto são novamente pesadas, nos procedimentos efetuados repetiu-se este ciclo por mais 2 vezes, contabilizando assim 3 ciclos para cada conjunto de 10 porções rochosas.

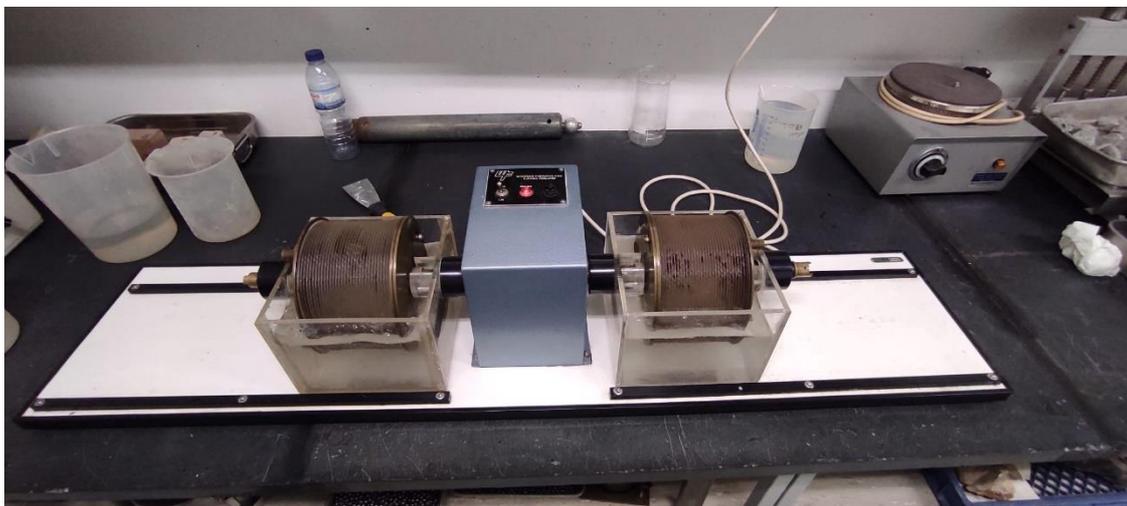


Figura 25 Slake Durability Test: equipamento.

O valor do índice de durabilidade ( $I_d$ ) é traduzido pela relação, em termos percentuais, entre a massa do material rochoso seco após cada ciclo e a massa do material rochoso seco inicial.

Na Tabela 8 pode observar-se a classificação de durabilidade definida por Aufmuth (1974), para o material rochoso após o 1º ciclo:

Tabela 8 Classificação de durabilidade de Aufmuth (1974) para o primeiro ciclo.

<b>Categoria</b>	<b>Descrição</b>
A	Alta durabilidade (menos de 1 % material perdido)
B	Durabilidade média (menos de 3,5 % mas mais de 1% material perdido)
C	Baixa durabilidade (mais de 3,5 % material perdido)

Na Tabela 9 é apresentada a classificação de Gamble (1971), utilizada para os provetes após o 2º ciclo.

*Tabela 9 Classificação do Índice de Durabilidade de Gamble (1971) para o segundo ciclo.*

Índice de Durabilidade (%)	Classificação
0 – 30	Muito baixo
30-60	Baixo
60-85	Médio
85-95	Médio alto
95-98	Alto
98-100	Muito alto

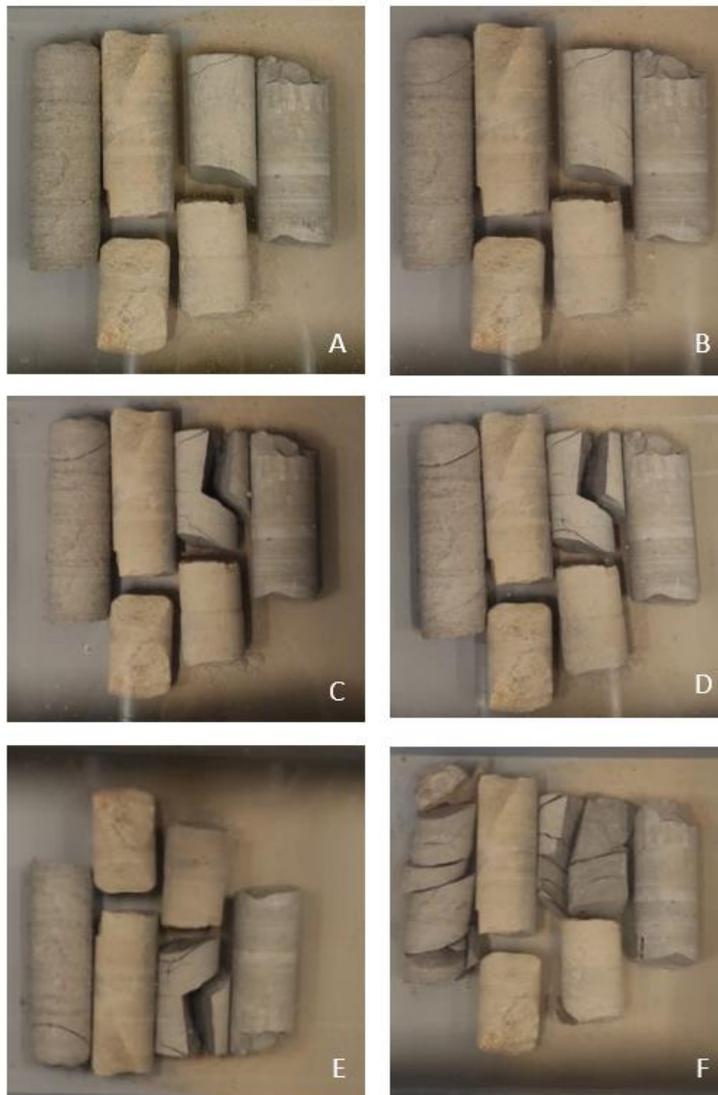
## 5.7. Últimos ensaios

Foram repetidos dois tipos de ensaios efetuados (Point Load Test, Slake Durability Test) e realizou-se um ensaio experimental do comportamento do material submerso em água por 24h, sendo necessário utilizar material rochoso proveniente de outras caixas de sondagens, dado que muitos dos provetes utilizados nos ensaios ficaram completamente destruídos devido aos procedimentos dos próprios ensaios realizados e pelas características do próprio material rochoso, estando assim inutilizáveis para se utilizarem nos dois tipos de ensaios que foram repetidos. Procedeu-se à repetição dos ensaios Point Load Test, neste caso com os provetes previamente saturados. Nos ensaios Point Load Test anteriores, os provetes foram recolhidos das caixas de sondagem e testados nas condições de humidade existentes do laboratório, enquanto, na sua repetição, os provetes foram submersos em água, durante 24 horas, antes da realização do ensaio.

Foi também repetido o ensaio de desgaste em meio húmido a fim de confirmar os resultados obtidos, uma vez que se previam resultados que revelassem um maior desgaste ou menor durabilidade, dado que o material apresentou sempre uma fragmentação elevada na presença de água.

Realizou-se, ainda, uma derradeira experimentação, que consistiu em submergir alguns provetes por 24h e documentar através de fotografias digitais, o seu comportamento quando submersos em água (Figura 26).

Na figura 26 é apresentado o comportamento dos provetes submergidos ao longo do tempo. A Figura 26 A corresponde ao primeiro minuto do ensaio, em 26 B após os primeiros 10 min, em 26 C após a primeira hora de ensaio, em 26 D após a segunda hora de ensaio e em 26 E e 26 F, os provetes foram submetidos a 24h de ensaio. Os provetes de 26 F foram submersos em água o mesmo período de tempo dos que os provetes presentes em 26 E, mas com a diferença dos provetes em 26 F terem sido remexidos, de forma a observar de forma mais completa o estado de fragmentação dos provetes no final do ensaio.



**Figura 26** Ensaio experimental: Provetes submersos em água por 24h. A) Primeiro minuto; B) 10 min de ensaio; C) 1h de ensaio; D) 2h de ensaio; E) 24h de ensaio; F) Provetes remexidos (24h de ensaio).

## 6. Classificação Mecânica RMR (Rock Mass Rating)

Os sistemas de classificação de maciços rochosos foram inicialmente estabelecidos para aplicação em explorações subterrâneas e construções de túneis. Posteriormente muitos destes sistemas foram criados e adaptados para ambientes de lavra de explorações a céu aberto ou grandes obras (pontes, edifícios, taludes), onde o estado de tensão difere por completo de uma situação de exploração subterrânea. A utilização das classificações geomecânicas é muito importante, dado que permite a estimativa de parâmetros de resistência e comportamento, em geral, do maciço rochoso. Nos sistemas de classificação geomecânica salienta-se o Rock Mass Rating, pela sua grande aplicação. Este sistema de classificação de rochas foi apresentado por Bieniawski (1976) denominado de Classificação Geomecânica ou de sistema Rock Mass Rating (RMR). Este sistema nos anos seguintes foi se redefinindo, à medida que se consideravam novas situações, tendo sido então feitas várias alterações ao sistema inicial proposto, nomeadamente na pontuação atribuída a cada parâmetro de classificação. Este sistema, proposto e desenvolvido por Bieniawski (1976, 1989), é definido pelo somatório de uma dada pontuação relativa a parâmetros relacionados com as características físicas, geométricas e mecânicas do maciço e do material rochoso:

- ➔ Resistência à compressão uniaxial e pontual da rocha;
- ➔ Rock Quality Designation (RQD);
- ➔ Espaçamento das descontinuidades;
- ➔ Orientação das descontinuidades.
- ➔ Condição das descontinuidades;
- ➔ Percolação de água.

Na aplicação deste método o maciço rochoso é dividido em diferentes regiões estruturais e cada região é classificada separadamente. Os limites destas regiões podem identificar-se com a presença de falhas ou com uma mudança litológica.

O sistema de classificação do maciço rochoso é apresentado na Tabela 10, que fornece as classificações para cada um dos parâmetros citados acima. Proceder-se então à classificação do maciço rochoso pelo somatório dos valores determinados, obtendo-se assim o Índice de Qualidade RMR para cada zona geotécnica de um dado maciço, variando este valor entre 0 e 100.

**Tabela 10** Sistema de Classificação Geomecânica de RMR (adaptado de Bieniawski (1989)).

A. Parâmetros de classificação e pontuações									
Parâmetros de classificação			Coeficientes						
1	Resistência do material rochoso intacto	Point Load (Mpa)	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial (Mpa)	> 250 MPa	100 – 250 MPa	50 – 100 MPa	50 – 100 MPa	5-25 MPa	1-5 Mpa	< 1 MPa
	Peso	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD	90 - 100 %	75 – 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	< 25 %			
	Peso	20	17	13	8	3			
3	Espaçamento das descontinuidades	> 2 m	2,0 – 0,6 m	60 – 20 cm	20 – 6 cm	< 60 mm			
	Peso	20	15	10	8	5			
4	Condições das descontinuidades (ver E)	Superfícies muito rugosas Não contínuas Nenhuma separação Superfície de rocha inalterada		Superfícies ligeiramente rugosas Separação	Superfícies ligeiramente rugosas Separação	Superfícies lisas ou enchimento com espessura < 5 mm ou separação 1-5 mm contínua	Enchimento mole com espessura >5 mm ou juntas contínuas com separação >5 mm		
		Peso	30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Caudal por 10 m de comprimento do túnel	Nenhum	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min		
		Relação pressão da água/tensão máxima principal	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Condições gerais	Seco	Ligeiramente húmido	Húmido	Gotejando	Fluente		
	Peso	15	10	7	4	0			

E. Guia para a classificação das condições das descontinuidades (parâmetro A.4)					
Comprimento das descontinuidades (persistência)	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Separação das descontinuidades (abertura média)	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosas	Rugosas	Ligeiramente rugosas	Aplanadas	Estriadas
Peso	6	5	3	1	0
Material de preenchimento das descontinuidades	Ausência de preenchimento	Com material duro < 5 mm	Com material duro > 5 mm	Com material brando < 5 mm	Com material brando > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Estado de alteração das superfícies das descontinuidades	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Decompostas
Peso	6	5	3	1	0

<b>B. Reajustamento dos pesos em função da orientação das discontinuidades (ver F)</b>						
Direção e pendor das fracturas		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

<b>C. Classes dos maciços</b>					
Peso	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21
Nº de classes	I	II	III	IV	V
Descrição	Maciço muito bom	Maciço bom	Maciço regular	Maciço pobre	Maciço muito pobre

## 6.1. Parâmetros

### 6.1.1. Resistência à compressão uniaxial e pontual da rocha

A resistência do material rochoso no caso em estudo foi obtida através do ensaio de resistência à carga pontual (Point Load Test). Pode ainda ter-se uma ideia aproximada da resistência do material rochoso pela realização de ensaios de determinação da dureza através do esclerómetro do tipo de martelo de Schmidt, que constitui um ensaio rápido e não destrutivo, apesar do seu grau elevado de incerteza. O ensaio laboratorial de resistência à compressão uniaxial também pode ser utilizado para determinar este parâmetro.

### 6.1.2. RQD

O índice RQD (*Rock Quality Designation*), desenvolvido por Deere (1967), está relacionado com a qualidade do maciço rochoso, nomeadamente com o seu estado de alteração e fracturação. Este índice obtém-se a partir dos testemunhos de sondagem, através do somatório do comprimento dos tarolos com dimensão superior a 10 cm e o comprimento total furado em cada manobra de uma sondagem (Figura 27).

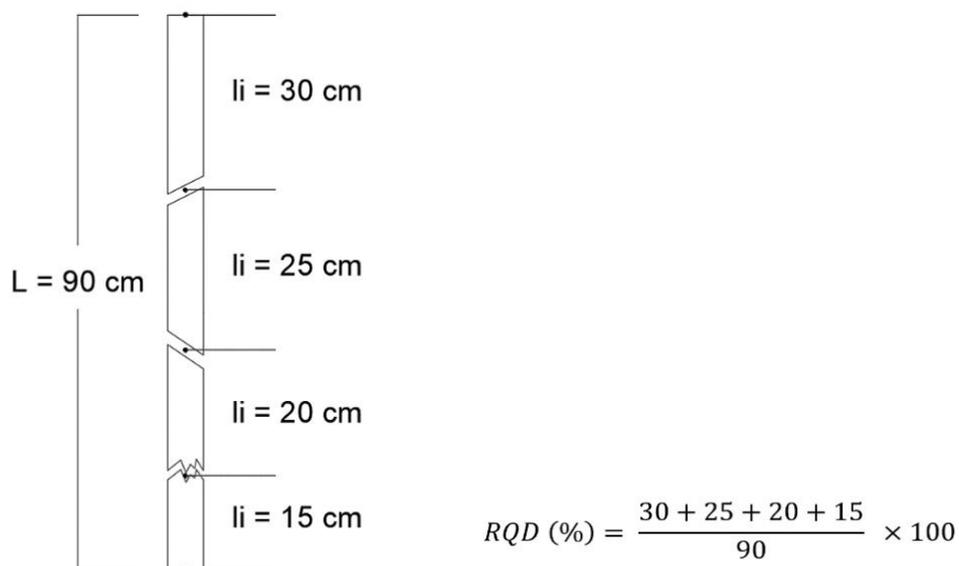


Figura 27 Exemplo do método de medição num testemunho de sondagem.

O índice RQD é calculado com base na Equação 7:

$$RQD (\%) = \frac{\sum l_i (> 10 \text{ cm})}{L} \times 100 \quad (\text{eq. 7})$$

Onde:

$\sum l_i (>10 \text{ cm})$  - Somatório dos troços de amostra com dimensão superior a 10 cm

L - Comprimento total furado em cada manobra

Com os dados obtidos por esta expressão é possível definir a qualidade dos maciços rochosos, correlacionando o valor do RQD obtido com a Tabela 11 proposta por Deere (1967):

*Tabela 11 Rock Quality Designation (RQD) (Deere & Deere, 1989).*

RQD	Qualidade do Maciço Rochoso
0 – 25 %	Muito fraco
25 – 50 %	Fraco
50 – 75 %	Razoável
75 – 90 %	Bom
90 – 100 %	Excelente

### 6.1.3. Espaçamento das descontinuidades

Descontinuidades são planos de fracturas, diáclases, falhas, superfícies de estratificação ou outras descontinuidades geológicas que dividem a rocha em blocos ou massas menores. O parâmetro do espaçamento das descontinuidades, é um dos mais importantes dentro do sistema RMR pois afeta diretamente a resistência do maciço rochoso, e um maciço rochoso enfraquecido pode afetar a sua capacidade de suportar cargas, como a força gravítica num talude ou a pressão exercida numa escavação subterrânea.

Este parâmetro refere-se à distância média entre as descontinuidades presentes numa determinada seção de rocha, quanto menor for o espaçamento entre as descontinuidades, mais descontinuidades estarão presentes numa determinada área.

Na Tabela 12 a classificação elaborada pela ISRM (1978, 1981):

*Tabela 12 Classificação dos maciços de acordo com o espaçamento das descontinuidades (ISRM, 1978, 1981).*

Simbologia	Intervalos entre fracturas (cm)	Designação
F <sub>1</sub>	> 200	Muito afastadas
F <sub>2</sub>	60 - 200	Afastadas
F <sub>3</sub>	20 - 60	Medianamente afastadas
F <sub>4</sub>	6-20	Próximas
F <sub>5</sub>	< 6	Muito próximas

#### **6.1.4. Orientação das descontinuidades**

As orientações das descontinuidades estão muitas vezes associadas às tensões que afetaram os maciços rochosos e a sua anisotropia, podendo condicionar a resistência das massas rochosas (Andrade, 2014). As coordenadas geológicas das descontinuidades podem ser obtidas através da utilização de uma bússola de geólogo, que permite a determinação da direção e pendor de um plano.

A orientação das descontinuidades (Tabela 10 B) é mais um dos parâmetros a ser considerados no cálculo do RMR. É importante determinar as atitudes preferenciais das descontinuidades no maciço rochoso, dado que estas podem afetar a estabilidade dos taludes e escavações. A existência de descontinuidades com sentido de pendores, semelhantes aos da face do talude pode aumentar o risco de rutura e deslizamento.

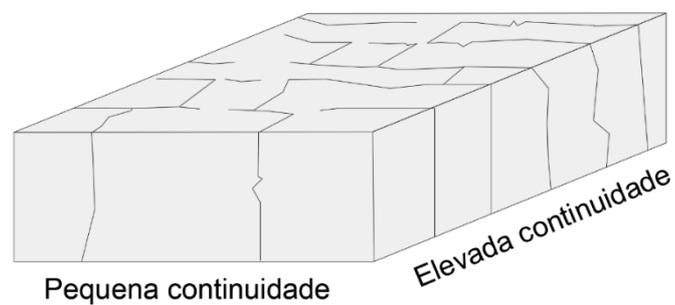
#### **6.1.5. Condições das descontinuidades**

Relativamente a este parâmetro já foram identificadas na Tabela 10 E os 5 fatores relacionados às características das descontinuidades:

- ➔ Persistência (Comprimento das descontinuidades);
- ➔ Abertura (Separação das descontinuidades);
- ➔ Rugosidade;
- ➔ Preenchimento (Material de enchimento das descontinuidades);
- ➔ Grau de alteração (Estado de alteração das superfícies das descontinuidades).

### 6.1.5.1. Persistência

A persistência ou continuidade corresponde à extensão em área de uma superfície de descontinuidade. Descontinuidades persistentes podem se estender por distâncias consideráveis e afetar áreas significativas do maciço rochoso, aumentando o risco de instabilidades. Através da Figura 28, na área de “elevada continuidade” é possível observar que há a presença de um maior número de descontinuidades.



*Figura 28* Representação simples para exemplificar a continuidade relativa de várias famílias de descontinuidades – imagem AutoCAD.

A persistência pode ser medida diretamente no maciço rochoso, em superfícies expostas. Com o recurso a uma fita métrica procede-se à medição da continuidade ao longo da superfície de descontinuidade. As medições devem ser agrupadas por famílias de descontinuidades, de modo a obter um valor médio de persistência por família. De acordo com o valor médio, é possível a classificação da continuidade tendo em atenção a Tabela 13 (ISRM 1978, 1981):

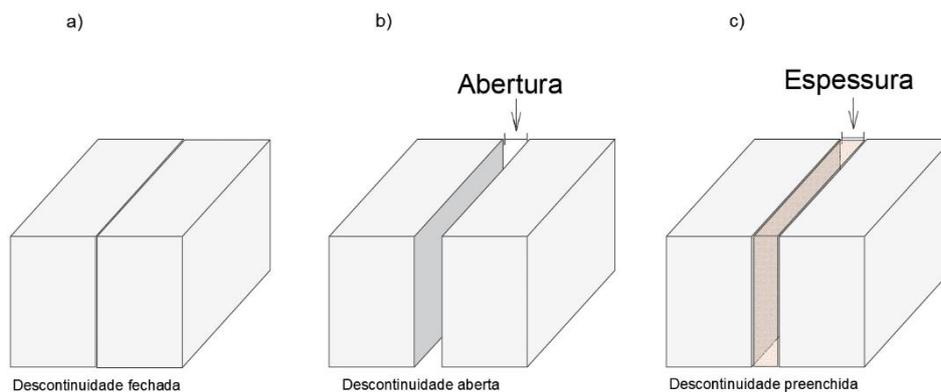
*Tabela 13* Classificação da continuidade segundo ISRM (ISRM 1978, 1981).

Continuidade	Distância (m)
Muito reduzida	< 1
Reduzida	1-3
Média	3-10
Elevada	10-20
Muito elevada	>20

### 6.1.5.2. Abertura e preenchimento

Abertura corresponde à distância entre as paredes adjacentes de uma superfície de descontinuidade no qual o espaço está ocupado por ar ou água (Figura 29 b)), sendo esta medição efetuada perpendicularmente a essas superfícies (Figura 29).

Enchimento corresponde ao material que preenche os espaços entre as paredes de uma determinada descontinuidade (Figura 29, c)).



**Figura 29** Representação simples para exemplificar a abertura das descontinuidades – imagem AutoCAD. a) Descontinuidade fechada; b) Descontinuidade aberta; c) Descontinuidade preenchida – imagem AutoCAD.

A abertura corresponde a um dos principais fatores que influenciam a permeabilidade dos maciços rochosos, afetando a infiltração e a drenagem de água. Quanto maior a abertura, maior será a capacidade de infiltração de água, o que pode originar a saturação e a diminuição da resistência do maciço rochoso. Além disso, uma abertura maior também pode reduzir a coesão da rocha nas proximidades da descontinuidade, diminuindo a resistência ao corte das descontinuidades, tornando-as mais propensa a deslizamentos ou deformações.

Já o preenchimento pode afetar significativamente as características mecânicas do maciço rochoso. Por exemplo, descontinuidades preenchidas podem apresentar uma resistência reduzida em comparação com descontinuidades sem material de preenchimento. Além disso, o preenchimento pode anular ou modificar a influência da rugosidade da descontinuidade, afetando o atrito e a possível resistência à movimentação entre as paredes das descontinuidades e, portanto, a estabilidade do maciço. No entanto também se pode evidenciar o contrário, dependendo das características do tipo de material de preenchimento,

sendo assim é necessário para cada situação proceder a um estudo cuidadoso das características do enchimento das descontinuidades.

Como já referido anteriormente neste parâmetro há que proceder à medição da abertura, medição essa que é determinada através de leituras com uma régua graduada (em milímetros) perpendicularmente às superfícies em estudo. É possível caracterizar cada família estudada individualmente pelo valor médio das aberturas através de uma classificação proposta pela ISRM (1978, 1981) apresentada na Tabela 14:

*Tabela 14 Classificação da abertura das descontinuidades (adaptado de ISRM, 1978, 1981).*

Abertura (mm)	Designação	
< 0,1	Muito fechadas	Fechadas
0,1-0,25	Fechadas	
0,25-0,5	Parcialmente fechadas	
0,5-2,5	Abertas	Abertas
2,5-10	Largas	
> 10	Razoavelmente largas	
10-100	Muito largas	Muito abertas
100-1000	Extremamente larga	
>1000	Cavernosas	

A abertura e o tipo de enchimento das descontinuidades fazem-se sentir de modo determinante em todos os parâmetros geotécnicos de um maciço: resistência, deformabilidade e permeabilidade.

### 6.1.5.3. Rugosidade

Neste parâmetro é avaliado o grau de aspereza ou irregularidade das superfícies das descontinuidades. Esta característica é uma componente importante no que respeita ao atrito entre faces, influenciando de modo determinante a resistência ao corte do maciço, sendo assim quanto maior for a rugosidade maior será a resistência ao deslocamento. A resistência diminui com o incremento da abertura, da espessura do material de preenchimento ou do valor do deslocamento tendo em atenção os movimentos de escorregamento registados anteriormente.

Este parâmetro pode ser determinado in situ através da comparação visual das superfícies das descontinuidades com perfis tipo de rugosidade da Figura 30 e da Tabela 15,

onde é possível identificar três classes gerais de rugosidade ISRM (1978, 1981): angulosas ou dentadas ou escalonadas, onduladas e planas. podendo ainda proceder-se à subdivisão em três subclasses: rugosa, lisa e estriada (ISRM 1978, 1981).

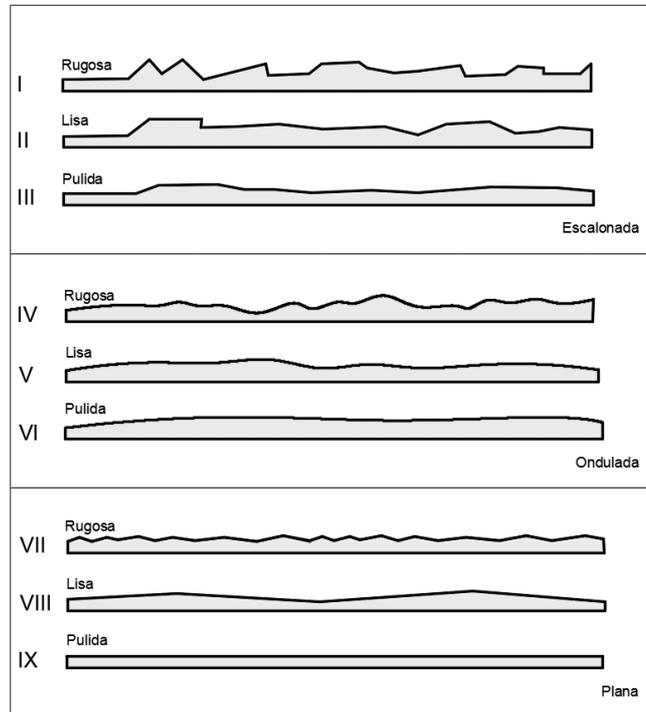


Figura 30 Perfis tipo de rugosidade (ISRM, 1981 in Vallejo et al., 2002).

Para o estudo da rugosidade das descontinuidades, adaptou-se a classificação presente no RMR (1989), sendo que na Tabela 15, observa-se a classificação proposta pela ISRM (1981).

Tabela 15 Classificação da rugosidade das descontinuidades (adaptado de ISRM, 1978 e 1981).

Designação das descontinuidades	Rugosidade	Classes	
Angulosas, dentadas ou escalonadas	Ásperas (rugosas ou irregulares)	I	A
	Lisas	II	
	Estriadas	III	
Onduladas	Ásperas (rugosas ou irregulares)	IV	B
	Lisas	V	
	Estriadas	VI	
Planas	Ásperas (rugosas ou irregulares)	VII	B
	Lisas	VIII	
	Estriadas	IX	

#### 6.1.5.4. Grau de alteração

O grau de alteração de uma rocha é função dos fatores capacidade em conjunto com os fatores intensidade ao longo do tempo, ou seja, para um determinado material rochoso, o grau de meteorização é função dos agentes externos e do tempo no decorrer do qual se exerceu a sua atuação (Sampaio, 2006). Este processo vai alterar uma certa espessura da parte externa da rocha, tornando-a assim num material cujos constituintes podem ser mobilizados e evacuados pelos agentes de erosão.

Existem 5 graus distintos de alteração segundo a ISRM (1981), que variam desde uma leve alteração até uma decomposição total. Estes graus de alteração podem ser definidos quantitativamente, de acordo com a medição de parâmetros como a resistência do material rochoso e a velocidade de propagação de ultrassons. Na Tabela 16 encontram-se descritos os 5 graus de alteração propostos pela ISRM (1981):

*Tabela 16* Graus de alteração de maciços rochosos considerados pela ISRM (1981).

Simbologia	Designação	Descrição
W <sub>1</sub>	São ou não alteradas	Não se verificam sinais de alteração da matriz rochosa
W <sub>2</sub>	Ligeiramente alterada	Sinais de alteração apenas nas superfícies das discontinuidades
W <sub>3</sub>	Moderadamente alterada	Alteração visível em todo o maciço rochoso mas a maior parte do material rochoso não é friável
W <sub>4</sub>	Muito alterada	Alteração visível em todo o maciço e a maior parte do material rochoso é friável
W <sub>5</sub>	Completamente alterada	Todo o material rochoso está muito decomposto e/ou desagregado num solo residual.

#### 6.1.5.5. Percolação de água

A presença de água em maciços rochosos pode causar vários problemas negativos ao nível da resistência do maciço, modificando as suas características geotécnicas. Esta presença de água pode verificar-se ao longo das superfícies ou paredes das discontinuidades, podendo ocorrer a percolação de água. Podem definir-se dois estados de permeabilidade: permeabilidade primária, na qual a percolação se verifica através da matriz rochosa e

permeabilidade secundária, na qual a percolação ocorre ao longo das superfícies das descontinuidades (Ahmed, 1946).

Ao nível da estabilidade de taludes, a percolação de água nos solos e maciços rochosos pode influenciar a estabilidade de taludes e vertentes. Se uma grande quantidade de água se infiltrar no solo, pode reduzir a coesão deste e aumentar o risco de deslizamentos de terra e instabilidades em encostas. A percolação da água em escavações constitui, também, uma preocupação significativa. A água infiltrada pode enfraquecer a resistência dos terrenos nas áreas próximas à escavação e causar instabilidades nas paredes da escavação.

No que diz respeito às fundações e capacidade de carga, a presença e percolação de água também é um fator crítico na determinação da capacidade de carga das fundações. Quando a água se movimenta através do terreno, ela pode arrastar consigo partículas finas e levar a uma redução na resistência do terreno, o que pode afetar a capacidade de suporte das fundações de uma estrutura. A percolação também desempenha um papel importante no processo de consolidação dos solos, pois, quando a água percola através dos poros dos solos, pode existir uma diminuição do volume dos sedimentos, resultando em assentamentos e, eventualmente, roturas do terreno.

Conhecer este parâmetro é bastante relevante, para entender o comportamento e a resposta dos solos e rochas a diferentes condições hidrológicas e hidrogeológicas, de modo a evitar ou minimizar situações de instabilidade.

## 7. Resultados

### 7.1. Resultados dos ensaios laboratoriais

O objetivo do presente trabalho visa conhecer as características físicas e mecânicas do material calco-margoso estudado. O grau de alteração do material foi classificado com base na observação visual do mesmo, e também considerando as suas características físicas e mecânicas. A avaliação visual foi efetuada *in situ* e em laboratório, diretamente dos provetes. O levantamento *in situ* foi condicionado, dado que no local de estudo existe apenas um afloramento, de pequenas dimensões e bastante erodido (Figura 3).

As características físicas e mecânicas do material em estudo foram determinadas seguindo as recomendações da ISRM (1981, 1985, 1999); EN 14579 (IPQ, 2007); NP EN 1936 (2008); Norma Europeia EN 13755 (2001).

Para os ensaios de caracterização foram utilizados provetes provenientes das sondagens mecânicas realizadas na área de estudo.

#### 7.1.1. Amostragem e preparação dos provetes

Os provetes para os ensaios mecânicos foram selecionados após a sua caracterização litológica, estrutural e definição do grau de alteração. A seleção e referência restringiu-se aos materiais recolhidos em 3 furos de sondagem (S4, S5 e S6), correspondendo às sondagens de maior profundidade. Devido às características físicas do material em estudo, dividiram-se os tarolos em dois tipos de materiais, um que se considerou como menos resistente, calcário margoso amarelo, e um considerado mais resistente *à priori*, calcário margoso cinzento.

Após esta seleção e referência, os tarolos foram conduzidos ao laboratório de Geotecnia do Departamento de Ciências da Terra para serem submetidos ao corte dos seus topos. Este corte foi realizado utilizando uma serra elétrica de disco diamantado. Este processo acabou por deteriorar alguns provetes, dado que o material em algumas situações se fraturava junto das extremidades, tornando-os inutilizáveis para a realização dos ensaios de caracterização. Os cortes foram realizados de modo que os provetes a utilizar possuíssem um comprimento mínimo de 10 cm, de modo a estarem de acordo com as normas exigidas em alguns dos ensaios a realizar, como é o caso dos ensaios dos ultrassons.

Foram obtidos 38 provetes cilíndricos resultantes deste processo de corte, com comprimentos compreendidos entre 103 mm e 254 mm.

### **7.1.2. Ensaio de velocidade de propagação das ondas sísmicas (ultrassons)**

Como já abordado no Capítulo 5.1. a velocidade de propagação dos ultrassons é um parâmetro importante para a caracterização física dos materiais rochosos.

Para o início deste ensaio foi necessário calibrar o aparelho de ultrassons de acordo com as recomendações do fabricante. Após o aparelho se encontrar devidamente calibrado, procedeu-se ao início do ensaio. Em primeiro lugar procedeu-se à realização dos ensaios dos ultrassons com 37 amostras secas, sendo que 23 representam o calcário cinzento e as restantes o calcário amarelo.

Houve ainda a realização do mesmo ensaio dos ultrassons, seguindo o mesmo procedimento, mas com a utilização dos provetes saturados. No entanto o número de provetes ensaiados foi menor, pois devido aos processos de saturação com água, muitos dos provetes acabaram por se danificar, impossibilitando assim a utilização do número previsto de provetes (37). Deste modo foram testados 13 provetes saturados em água de calcário cinzento e 8 provetes saturados em água de calcário amarelo.

Na Tabela 17 apresentam-se as médias dos valores obtidos da medição da velocidade de propagação das ondas de ultrassons. Nos Anexos são apresentados a totalidade dos valores dos ensaios realizados.

Como se pode verificar, em geral, há um ligeiro aumento da velocidade média de propagação das ondas P e S no calcário amarelo em relação ao calcário cinzento com exceção para a velocidade média das ondas S para os provetes saturados de calcário cinzento e amarelos, que apresentam uma diminuição da velocidade média de propagação em relação aos provetes secos.

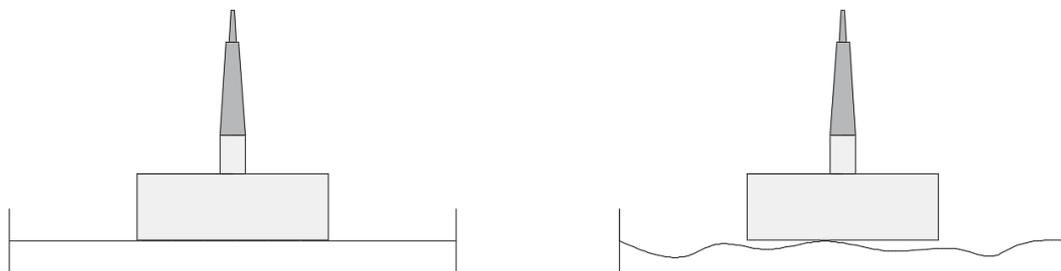
De referir que o valor obtido do Coeficiente de Variação (CV) apresentado na Tabela 17 e relativo às velocidades das ondas S para os provetes saturados é um valor extremamente elevado, e compromete a fiabilidade dos resultados encontrados para os provetes saturados.

**Tabela 17** Síntese dos valores obtidos no Ensaio de determinação das velocidades de propagação das ondas ultrassom.

		Secos			Saturados		
		Ondas P m/s 24 kHz	Ondas S m/s 250 kHz	S/P	Ondas P m/s 24 kHz	Ondas S m/s 250 kHz	S/P
Nº de provetes		23			13		
<b>Calcário cinzento</b>	Média	3036	2122	0,699	2974	1432	0,482
	Desvio Padrão	339	304		385	382	
	CV	0,11	0,14		0,13	0,27	
	Mínimo	2422	1405	0,580	2401	704	0,293
	Máximo	4134	2764	0,669	3781	1970	0,521
Nº de provetes		14			8		
<b>Calcário amarelo</b>	Média	3179	2478	0,779	3209	986	0,307
	Desvio Padrão	363	539		596	973	
	CV	0,11	0,12		0,19	0,99	
	Mínimo	2462	1257	0,511	3005	642	0,214
	Máximo	3564	3196	0,897	4598	3691	0,803

Conforme a classificação da IAEG (1979) (Tabela 4) classificou-se a velocidade de propagação das ondas longitudinais para o calcário cinzento e calcário amarelo como baixa.

Na medição das ondas ultrassónicas dos provetes saturados deve mencionar-se que os provetes saturados, e que são provenientes dos ensaios de massa volúmica e porosidade aberta, na presença de água, revelaram a ocorrência de algumas fracturas e/ou irregularidades nas superfícies dos provetes onde se procede ao acoplamento dos transdutores, tornando assim o acoplamento entre o provete, os recetores e os emissores do impulso ainda mais difícil e em alguns casos os provetes revelaram não serem utilizáveis devido ao seu nível de destruição (Figura 31).



**Figura 31** Esquema representativo do acoplamento dos transdutores. À esquerda da figura um transdutor acoplado numa superfície plana (Bom acoplamento); À direita um transdutor acoplado numa superfície com irregularidades (Mau acoplamento) – imagem AutoCAD.

### 7.1.3. Determinação da massa volúmica aparente e porosidade aberta

Como já descrito Capítulo 5.2. os ensaios de massa volúmica e a porosidade aberta do material rochoso no presente trabalho foram executados de acordo com a norma NP EN 1936 (2008). Nas Tabelas 18 e 19 encontram-se os valores médios obtidos nos ensaios correspondentes:

*Tabela 18 Síntese dos valores obtidos no Ensaio de massa volúmica aparente e da porosidade aberta (Calcário cinzento).*

	Calcário cinzento (23 amostras)	
	Porosidade %	Massa Volúmica aparente (kg.m <sup>-3</sup> )
<b>Média</b>	8,94	2512,77
<b>Desvio Padrão</b>	2,97	26,88
<b>Coefficiente de variação</b>	0,33	0,01

*Tabela 19 Síntese dos valores obtidos no Ensaio de massa volúmica aparente e da porosidade aberta (Calcário amarelo).*

	Calcário amarelo (15 amostras)	
	Porosidade %	Massa Volúmica aparente (kg.m <sup>-3</sup> )
<b>Média</b>	9,67	2493,05
<b>Desvio Padrão</b>	3,34	25,75
<b>Coefficiente de variação</b>	0,35	0,01

De acordo com a Tabela 18, o calcário cinzento apresenta uma porosidade aberta média de 8,94% e uma massa volúmica média de 2512,77 kg.m<sup>-3</sup>, já o calcário amarelo de acordo com a Tabela 19 apresenta uma porosidade aberta média de 9,67%, e uma massa volúmica média de 2493,05 kg.m<sup>-3</sup>.

O calcário amarelo é em termos médios ligeiramente mais poroso que o calcário cinzento, havendo uma situação inversa no que diz respeito à massa volúmica aparente, no entanto, trata-se de diferença muito pequena.

De acordo com as classificações da IAEG (1979), pode definir-se que a massa volúmica para ambos os calcários, cinzentos e amarelos, é intermédia. O mesmo se verifica para a porosidade aberta, onde ambos os calcários foram classificados de modo igual, definindo-se como de porosidade intermédia.

#### 7.1.4. Point Load Test

Neste ensaio seguiram-se os procedimentos propostos pela ISRM (1985) como foram descritos no Capítulo 5.3. Utilizaram-se 18 provetes secos de calcário cinzento e 12 provetes secos de calcário amarelo. Procedeu-se igualmente à realização de ensaios com provetes saturados em água, para estes últimos foi necessário selecionar e referenciar mais amostras dado que estas se fraturavam facilmente quando imersas em água. Os provetes saturados testados no Point Load Test foram, respetivamente, 11 de Calcário cinzento e 10 de Calcário amarelo.

Nas Tabelas 20 e 21 encontram-se os resultados médios obtidos na sequência deste ensaio:

*Tabela 20 Síntese dos valores no Ensaio de Point Load Test (Provetes secos).*

	Secos	
	Calcário cinzento (18 provetes)	Calcário amarelo (12 provetes)
<b>Média (MPa)</b>	2,75	4,13
<b>Desvio Padrão (MPa)</b>	0,94	0,67
<b>Coefficiente de Variação</b>	0,34	0,16

*Tabela 21 Síntese dos valores obtidos no Ensaio Point Load Test (Provetes saturados).*

	Saturados	
	Calcário cinzento (11 provetes)	Calcário amarelo (10 provetes)
<b>Média (MPa)</b>	1,51	1,06
<b>Desvio Padrão (MPa)</b>	0,77	0,12
<b>Coefficiente de Variação</b>	0,51	0,12

O calcário amarelo seco apresentou um valor médio do  $I_{s(50)}$  de 4,13 MPa e para o calcário cinzento seco registou-se um valor médio do  $I_{s(50)}$  de 2,75 MPa (Tabelas 20 e 21). Já no estado saturado, o calcário amarelo apresentou valores inferiores ao calcário cinzento, neste caso 1,06 MPa face a 1,51 MPa (Tabelas 22 e 23). Tendo em conta os resultados apresentados nas Tabelas 22 e 23 é possível constatar um decréscimo nos valores médios do  $I_{s(50)}$  das amostras saturadas em relação aos valores das amostras secas (Tabelas 20 e 21).

De acordo com a classificação de Bieniawski (1979) (Tabela 7), pode classificar-se a resistência do material rochoso, como elevada para os calcários cinzentos secos, e de muito

elevada para os calcários amarelos secos. Já para o estado saturado, ambos se classificam como moderados.

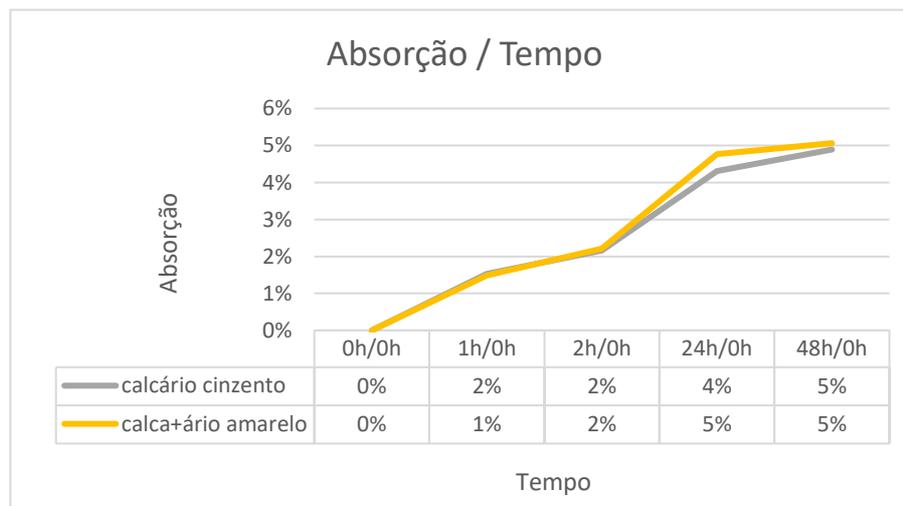
### 7.1.5. Ensaio de absorção

Para o ensaio de absorção foram testados 22 provetes de calcário cinzento e 14 provetes de calcário amarelo tendo como resultados os valores médios obtidos da Tabela 22:

*Tabela 22 Síntese dos valores obtidos no Ensaio de Absorção.*

	Calcário cinzento					Calcário amarelo				
	0h/0h	1h/0h	2h/0h	24h/0h	48h/0h	0h/0h	1h/0h	2h/0h	24h/0h	48h/0h
<b>Média %</b>	0,0%	1,5%	2,2%	4,3%	4,9%	0,0%	1,5%	2,2%	4,8%	5,1%
<b>Desvio Padrão</b>	0	0,005	0,007	0,012	0,014	0,000	0,005	0,009	0,014	0,012
<b>Coefficiente de Variação</b>		0,319	0,007	0,012	0,289		0,335	0,396	0,286	0,233

Como se verifica na Tabela 22 os valores de absorção para ambos os calcários são bastante similares, notando-se apenas uma ligeira diferença a partir das 24h de ensaio, onde o calcário amarelo começa a absorver ligeiramente mais água, neste caso 4,8% face aos 4.3% do calcário cinzento. Na Figura 32 é possível verificar a evolução e a diferença entre os calcários.



*Figura 32 Relação de absorção sobre o tempo.*

### 7.1.6. Martelo de Schmidt

Neste ensaio seguiu-se os procedimentos propostos pela ISRM (1981) como já descritos anteriormente no Capítulo 5.5.

Os provetes utilizados na realização deste ensaio encontravam-se às condições de humidade, de pressão e temperatura atmosférica do laboratório. Foram utilizados 8 provetes de calcário cinzento e 6 provetes de calcário amarelo. Como é possível constatar, o número de provetes presentes neste ensaio for menor do que para outros ensaios, o que está relacionado com a degradação e fracturação do material quando sujeito ao impacto do martelo de Schmidt, invalidado deste modo a utilização de vários provetes previamente seleccionados para o ensaio.

Na Tabela 23 apresentam-se os resultados da dureza de Schmidt (R) e da resistência à compressão uniaxial (RCU) obtida a partir do ábaco que se apresenta na Figura 23, em que se consideram os valores de R, da massa volúmica do material rochoso testado e da orientação do esclerómetro de Schmidt, que neste caso foi vertical. A massa volúmica foi obtida no Capítulo 7.1.3., e utilizaram-se os seus valores médios das Tabelas 18 e 19 (massa volúmica aparente em função do grau de alteração).

*Tabela 23 Síntese dos valores obtidos no Ensaio do Martelo de Schmidt.*

	Calcário cinzento (8 provetes)		Calcário amarelo (6 provetes)	
	R	RCU (MPa)	R	RCU (MPa)
Média	20,00	29	18,25	28
Desvio padrão	2,18	-	1,85	-
Mínimo	16	24	15,5	23
Máximo	23	32	21	27

Pela Tabela 23 é possível verificar que o calcário cinzento apresenta uma dureza de Schmidt, tendencialmente, superior à do calcário amarelo.

### 7.1.7. Ensaio de desgaste me meio húmido

Para definir a durabilidade do material realizou-se o ensaio de desgaste em meio húmido (slake durability test) seguindo as recomendações da ISRM (1981) descritas no Capítulo 5.6. Foram realizadas 12 séries de ensaios de 3 ciclos de secagem-humedecimento, sendo que cada uma dessas séries englobam duas a três amostras. Estas amostras foram agrupadas de acordo com a sua tonalidade (cinzenta e amarela). Das 12 séries, 8 corresponderam a calcário cinzento (8 primeiras séries do gráfico representado na Figura 33) e as restantes 4 a calcário amarelo (4 últimas séries do gráfico apresentado na Figura 33).

No gráfico na Figura 33 encontram-se os valores do Índice de durabilidade obtidos:

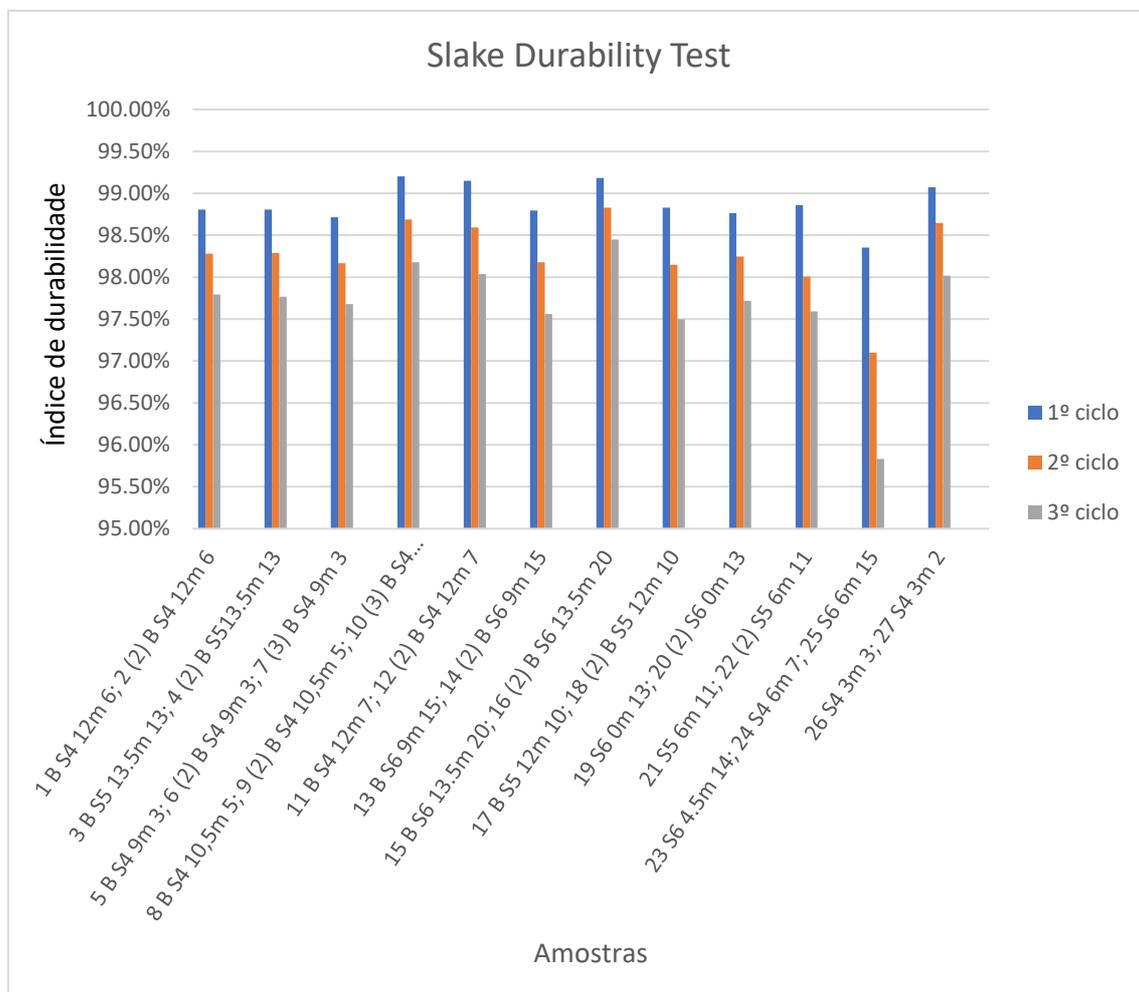


Figura 33 Resultado do Ensaio Slake Durability Test: valores do índice de durabilidade.

Para quase todas as séries avaliadas o valor de desgaste do material é baixo (índice de durabilidade elevado), havendo uma pequena diferença na penúltima série do gráfico, correspondente às amostras 23 S6 4.5m 14; 24 S4 6m 7; 25 S6 6m 15. Este resultado pode ser explicado, devido a terem sido utilizados materiais rochosos mais fracturados na execução dos ciclos do slake durability, pelo que o resultado obtido nesta série, correspondente aos calcários amarelos, foi ligeiramente diferente dos restantes.

Face aos resultados encontrados com índices de durabilidade elevados, considerou-se a necessidade de efetuar mais um conjunto de ensaios do slake durability test, uma vez que o material rochoso no decorrer de outros ensaios de caracterização, teve sempre um comportamento de fragmentação e de fracturação face à presença de água, o que não se evidenciou nos presentes ensaios de desgaste em meio húmido. Posto isto repetiram-se os referidos ensaios com novas amostras, cujo material rochoso não sofreu nenhum possível impacto de ensaios anteriormente realizados. Realizaram-se mais 6 séries de ensaios, cada série contou com 2-3 amostras, sendo que 3 das séries realizadas (3 primeiras séries do gráfico da Figura 34) corresponderam ao calcário cinzento e as restantes 3 ao calcário amarelo (3 últimas séries do gráfico da Figura 34). Os resultados obtidos encontram-se no gráfico da Figura 34:

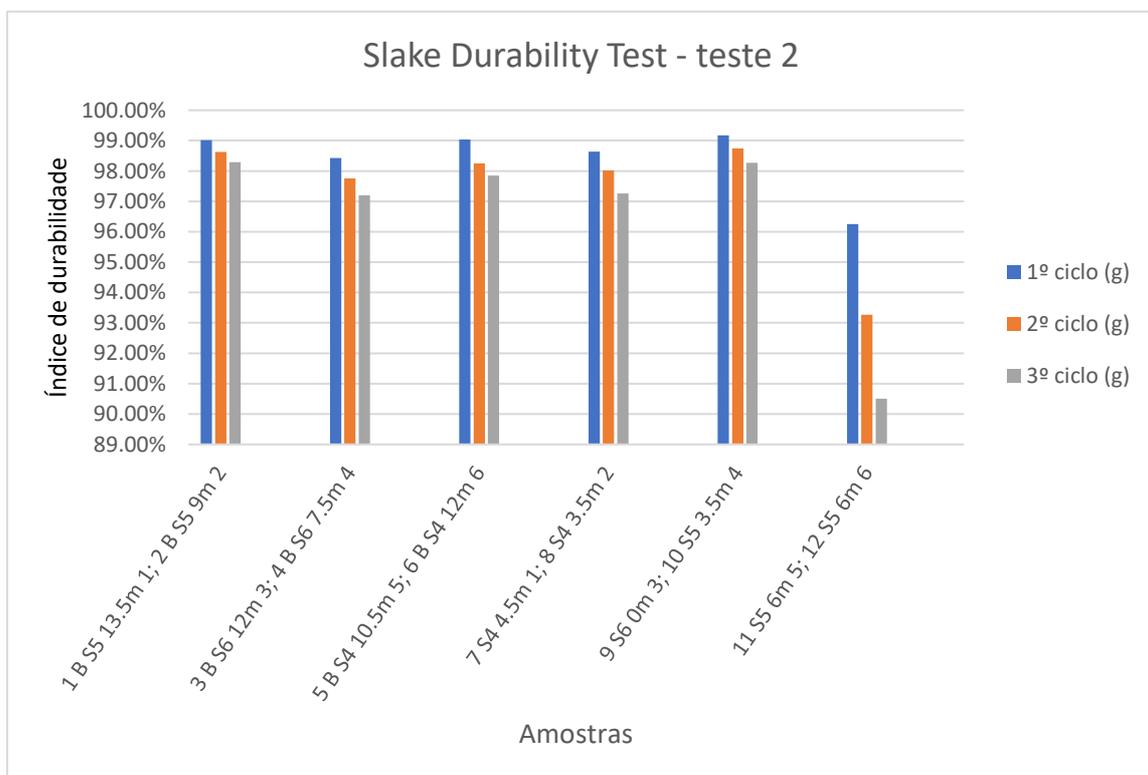


Figura 34 Resultado do Ensaio Slake Durability Test – teste 2: valores do índice de durabilidade.

Através da Figura 34 é possível confirmar que os resultados obtidos são semelhantes aos encontrados anteriormente (gráfico da Figura 34) comprovando que não houve alguma condicionante do material rochoso ou da execução dos ensaios que afetasse os primeiros conjuntos dos ensaios realizados.

Mais uma vez constatou-se uma pequena diferença, agora na última série do gráfico da Figura 34, correspondente mais uma vez às amostras de calcário amarelo (11 S5 6m 5; 12 S5 6m 6). De uma maneira geral pode considerar-se que o desgaste ocorrido nos ensaios de Slake Durability Test é baixo.

Segundo a classificação de Aufmuth (1974) descrita na Tabela 8 para o 1º ciclo pode considerar-se ambos os calcários na categoria B, correspondente a uma durabilidade média (menos de 3,5 % mas mais de 1% material perdido. De acordo com a classificação de Gamble (1971) para o 2º ciclo do Índice de durabilidade, descrita na Tabela 9, pode-se considerar uma classificação como de durabilidade muita alta (durabilidade superior a 98%) (Tabelas 24 e 25) para ambos os tipos de calcários.

**Tabela 24** Síntese dos valores médios obtidos no Ensaio de Slake Durability Test.

	Slake Durability Test – teste 1	1º ciclo	2º ciclo	3º ciclo
Calcário cinzento	1 B S4 12m 6; 2 (2) B S4 12m 6	98,81%	98,28%	97,79%
	3 B S5 13.5m 13; 4 (2) B S5 13.5m 13	98,81%	98,29%	97,77%
	5 B S4 9m 3; 6 (2) B S4 9m 3; 7 (3) B S4 9m 3	98,72%	98,17%	97,68%
	8 B S4 10,5m 5; 9 (2) B S4 10,5m 5; 10 (3) B S4 10,5m 5	99,20%	98,69%	98,18%
	11 B S4 12m 7; 12 (2) B S4 12m 7	99,15%	98,59%	98,04%
	13 B S6 9m 15; 14 (2) B S6 9m 15	98,79%	98,18%	97,56%
	15 B S6 13.5m 20; 16 (2) B S6 13.5m 20	99,18%	98,83%	98,45%
	17 B S5 12m 10; 18 (2) B S5 12m 10	98,83%	98,15%	97,50%
<b>Média</b>		<b>98,82%</b>	<b>98,28%</b>	<b>97,78%</b>
Calcário amarelo	19 S6 0m 13; 20 (2) S6 0m 13	98,76%	98,25%	97,72%
	21 S5 6m 11; 22 (2) S5 6m 11	98,86%	98,01%	97,59%
	23 S6 4.5m 14; 24 S4 6m 7; 25 S6 6m 15	98,35%	97,10%	95,83%
	26 S4 3m 3; 27 S4 3m 2	99,07%	98,65%	98,02%
<b>Média</b>		<b>98,81%</b>	<b>98,13%</b>	<b>97,66%</b>

**Tabela 25** Síntese dos valores médios obtidos no Ensaio de Slake Durability Test – teste 2

	Slake Durability Test – teste 2	1º ciclo	2º ciclo	3º ciclo
Calcário cinzento	1 B S5 13.5m 1; 2 B S5 9m 2	99,02%	98,62%	98,29%
	3 B S6 12m 3; 4 B S6 7.5m 4	98,43%	97,75%	97,20%
	5 B S4 10.5m 5; 6 B S4 12m 6	99,03%	98,25%	97,84%
<b>Média</b>		<b>99,02%</b>	<b>98,25%</b>	<b>97,84%</b>
Calcário amarelo	7 S4 4.5m 1; 8 S4 3.5m 2	98,64%	98,02%	97,26%
	9 S6 0m 3; 10 S5 3.5m 4	99,17%	98,75%	98,27%
	11 S5 6m 5; 12 S5 6m 6	96,25%	93,26%	90,50%
<b>Média</b>		<b>98,64%</b>	<b>98,02%</b>	<b>97,26%</b>

## 7.2. Resultado da Classificação RMR

Nas Tabelas 26, 27 e 28 encontram-se os resultados do sistema classificativo de RMR relativo ao maciço rochoso da área estudada. Destaca-se que nos primeiros metros de profundidade, mais concretamente até aos 3 m de profundidade o maciço rochoso classifica-se como pobre nas profundidades intersetadas pelos furos das sondagens S4 e S5. Já na sondagem S6 o maciço rochoso classifica-se como regular. Entre a profundidade de 3 m a 6 m, há uma alternância na classificação do maciço rochoso, alternando entre um maciço bom a regular, isto para a sondagem S5, evidenciando-se uma situação contrária na sondagem 6, onde se verifica uma alternância de um maciço rochoso regular para bom. A sondagem S4 o maciço classifica-se sempre como bom entre a profundidade de 3 m a 6 m. A partir da profundidade de 6 m o maciço classifica-se como maciço bom na sondagem S4. Na sondagem S5 entre os 6 m a 12 m classifica-se como maciço regular com interrupção entre a profundidade 7,5 m a 9 m em que o maciço rochoso classifica-se como bom. A partir da profundidade de 12 m o maciço rochoso intersetado pelo furo da sondagem S5 classifica-se como bom. A sondagem S6 a partir da profundidade de 6 m a 9 m alterna de uma classificação de um maciço rochoso bom a regular. A partir da profundidade de 9 m o maciço rochoso classifica-se como bom

Observando de forma individual os tipos de calcário em estudo, classifica-se o calcário amarelo como estando relacionado com um maciço pobre a bom e o calcário cinzento aparece associado à classificação de um maciço regular a bom.

**Tabela 26** Síntese dos valores obtidos no sistema classificativo de RMR – Sondagem S4. Parâmetros: 1 – Resistência do material rochoso intacto (Point Load Test); 2 - RQD; 3 – Espaçamento das descontinuidades; 4 – Condições das descontinuidades; 5 – Presença de água.

<b>S4</b>									
<b>Parâmetros</b>	<b>Calcário amarelo</b>			<b>Calcário cinzento</b>					
<b>Profundidade (m)</b>	<b>1,5-3</b>	<b>3-4,5</b>	<b>4,5-6</b>	<b>6-7,5</b>	<b>7,5-9</b>	<b>9-10,5</b>	<b>10,5-12</b>	<b>12-13,5</b>	<b>13,5-15</b>
<b>1</b>	12			7					
<b>2</b>	3	13	17	17	17	17	20	20	20
<b>3</b>	0	10	10	10	10	10	10	10	15
<b>4</b>	0	22	12	15	15	15	15	15	15
<b>5</b>	12	12	12	13	13	13	13	13	13
<b>Somatório</b>	27	69	63	63	63	63	65	65	70
<b>Classificação do maciço</b>	<b>Maciço pobre</b>	<b>Maciço bom</b>	<b>Maciço bom</b>	<b>Maciço bom</b>	<b>Maciço bom</b>	<b>Maciço bom</b>	<b>Maciço bom</b>	<b>Maciço bom</b>	<b>Maciço bom</b>

**Tabela 27** Síntese dos valores obtidos no sistema classificativo de RMR – Sondagem S5. Parâmetros: 1 – Resistência do material rochoso intacto (Point Load Test); 2 - RQD; 3 – Espaçamento das descontinuidades; 4 – Condições das descontinuidades; 5 – Presença de água.

<b>S5</b>									
<b>Parâmetros</b>	<b>Calcário amarelo</b>			<b>Calcário cinzento</b>					
<b>Profundidade (m)</b>	<b>1,5-3</b>	<b>3-4,5</b>	<b>4,5-6</b>	<b>6-7,5</b>	<b>7,5-9</b>	<b>9-10,5</b>	<b>10,5-12</b>	<b>12-13,5</b>	<b>13,5-15</b>
<b>1</b>	12			7					
<b>2</b>	3	8	3	8	17	13	13	17	20
<b>3</b>	0	10	10	15	10	10	8	8	15
<b>4</b>	0	22	12	15	15	15	15	15	15
<b>5</b>	12	12	12	13	13	13	13	13	13
<b>Somatório</b>	27	64	49	58	62	58	56	60	70
<b>Classificação do maciço</b>	<b>Maciço pobre</b>	<b>Maciço bom</b>	<b>Maciço regular</b>	<b>Maciço regular</b>	<b>Maciço bom</b>	<b>Maciço regular</b>	<b>Maciço regular</b>	<b>Maciço bom</b>	<b>Maciço bom</b>

**Tabela 28** Síntese dos valores obtidos no sistema classificativo de RMR – Sondagem S6. Parâmetros: 1 – Resistência do material rochoso intacto (Point Load Test); 2 - RQD; 3 – Espaçamento das descontinuidades; 4 – Condições das descontinuidades; 5 – Presença de água.

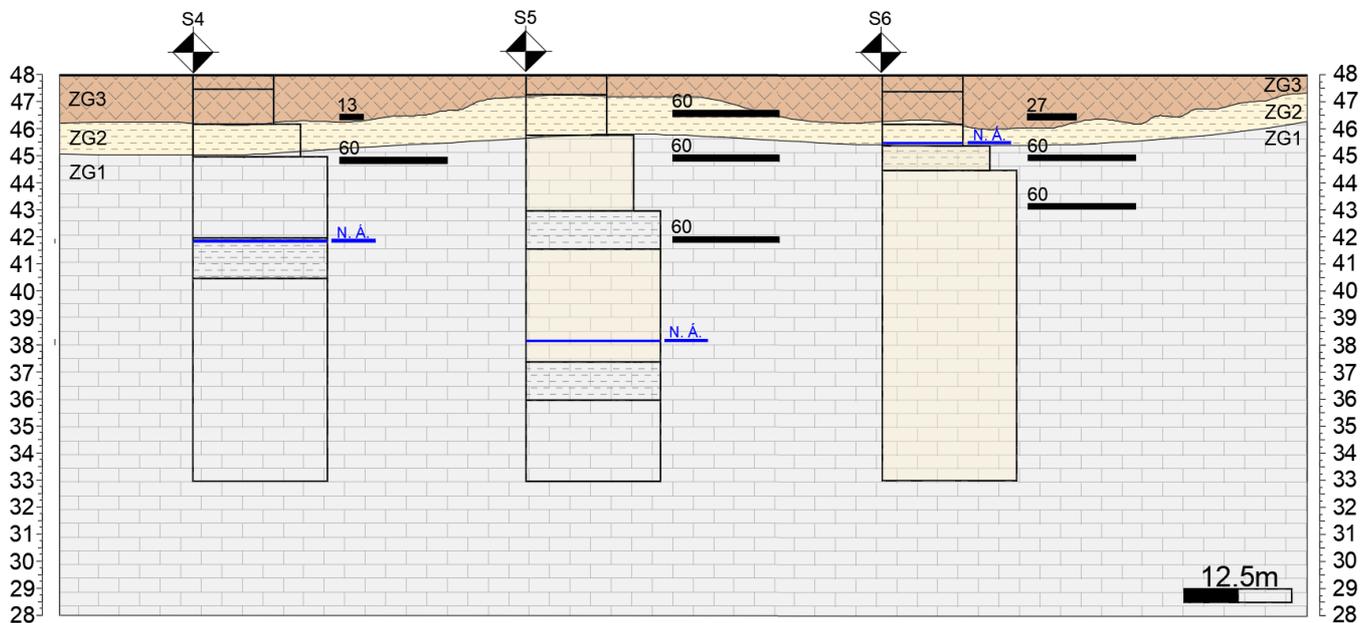
S6									
Parâmetros	Calcário amarelo			Calcário cinzento					
Profundidade (m)	1,5-3	3-4,5	4,5-6	6-7,5	7,5-9	9-10,5	10,5-12	12-13,5	13,5-15
1	12			7					
2	8	3	20	17	13	20	13	13	17
3	10	10	15	8	10	10	15	15	15
4	0	22	12	15	15	15	15	15	15
5	12	12	12	13	13	13	13	13	13
Somatório	42	59	71	60	58	65	63	63	67
Classificação do maciço	Maciço regular	Maciço regular	Maciço bom	Maciço bom	Maciço regular	Maciço bom	Maciço bom	Maciço bom	Maciço bom

### 7.3. Resultado do Zonamento Geotécnico

Os dados dos logs obtidos através dos trabalhos de prospeção mecânica (Capítulo 3) forneceram informação que permitiram a elaboração do perfil geotécnico (Figura 35) e os respectivos zonamentos geotécnicos. Estes logs de sondagem são representações dos resultados observados e das descrições das sondagens, onde se encontram as informações relativas à litologia, à percentagem de recuperação (%Rec), ao índice RQD (Rock Quality Designation), aos resultados dos ensaios Standard Penetration Test (SPT), quando existentes, o posicionamento do nível freático, o grau de alteração (W) e o grau de fracturação (F) (Vallejo et al., 2002).

Na Figura 35 encontra-se o perfil geotécnico correspondente às sondagens S4, S5 e S6, este perfil foi realizado no programa de desenho vetorial AutoCAD (2023). Foram definidas 3 zonas geotécnicas: ZG1, ZG2 e ZG3 de acordo com as características que foram analisadas do material proveniente das sondagens. Os logs das diferentes sondagens também acrescentaram na definição destas zonas geotécnicas, uma vez que forneceram dados de taxa de recuperação, de alteração, fracturação e dados do ensaio SPT ( $N_{SPT}$ ). As 3 zonas geotécnicas identificadas terão comportamentos geotécnicos diferentes, sendo que há uma melhora de comportamento da ZG3 até à ZG1.

O perfil realizado (Figura 35), teve como base as 3 sondagens mais profundas: S4, S5 e S6 (15 m).



**Legenda**

	Aterro/Argila (cor castanha) - ZG3
	Argila calcária (cor bege) - ZG2
	Calcário (cor cinzenta) - ZG1
	Calcário com pequeno nível argiloso (cor cinzenta) - ZG1
	Calcário com pequeno nível argiloso (cor bege) - ZG1
	Calcário (cor bege e cinzenta) - ZG1
	Pancadas do ensaio SPT (0-60)
	Nível da Água
	Sondagem

Figura 35 Perfil geotécnico (Sondagens S4, S5 e S6).

Para a definição das diferentes zonas geotécnicas, como já mencionado, recorreu-se a vários parâmetros de classificação que foram fornecidos pelos logs de sondagem. Entre os quais, para os solos, os resultados dos ensaios SPT, e para as rochas a percentagem de Recuperação, o índice RQD (Rock Quality Designation), o grau de alteração (W), o grau de fracturação (F) e a profundidade do nível de água após furação, que pode diferir do nível freático. A Resistência do material rochoso intacto é igualmente utilizada na definição da caracterização e zonamento geotécnico, sendo um dos parâmetros integrantes do sistema classificativo do RMR. Através do ensaio do *Point Load Test*, é possível obter o valor de  $Is_{(50)}$ , correspondente à resistência à carga

pontual corrigido para um diâmetro de 50 mm (Tabelas 20 e 21), este valor é associado ao parâmetro de resistência do material rochoso intacto do RMR (Tabelas 26, 27 e 28).

A percentagem de recuperação (%Rec) é um parâmetro quantitativo que reflete o estado de alteração e de fraturação de um maciço, e que está relacionado com a percentagem de material que é recuperado numa sondagem. Este é obtido através do quociente entre o comprimento total recuperado e o comprimento total da manobra, multiplicando por 100, sendo o valor final obtido em percentagem (Deere & Deere, 1989; Vallejo et al., 2002). Segundo Lima & Menezes (2012) são definidas 3 classes (Tabela 29): a primeira apresentando uma percentagem de recuperação superior a 80%, em que o maciço é pouco alterado e de boa qualidade, a segunda com uma percentagem de recuperação que se situa entre 50% e 80%, na qual o maciço é medianamente alterado, e a terceira classe com uma percentagem de recuperação inferior a 50%, em que o maciço é muito alterado e de má qualidade. A percentagem de recuperação é influenciada também por outros fatores, não dependentes das características do maciço, tais como o equipamento utilizado na furação e o manuseamento das amostras (carotes).

**Tabela 29.** Classificação do maciço rochoso, tendo em conta a percentagem de recuperação (Deere & Deere, 1989). Rec (Recuperação).

Intervalo	Descrição
Rec > 80%	Maciço pouco alterado, de boa qualidade
50% > Rec < 80%	Maciço medianamente alterado
Rec < 50%	Maciço muito alterado, de má qualidade

### 7.3.1. Zonas geotécnicas

#### 7.3.1.1. Zona geotécnica 3 (ZG3)

A zona geotécnica 3 (ZG3) é a mais superficial da área de estudo, compreendida entre a cota do nível do terreno e os 2 m de profundidade média, é composta por argilas, material de aterro, material de cobertura e resíduos de obras. Com uma taxa de recuperação média de 32%, e com a sua heterogeneidade e características litológicas, esta zona caracteriza-se como sendo pouco competente e não apresentando deste modo, aptidão geotécnica para suportar as

fundações do edifício previsto para a área considerada. Quanto ao valor SPT (N) foi obtido um valor médio de 33,5 (Tabela 30).

É sugerido que o material presente nesta zona seja removido na totalidade. Devido à fraca competência da ZG3, o material a remover será de fácil ripabilidade, podendo-se assim efetuar a escavação do local com métodos mecânicos ligeiros, por exemplo com uma retroescavadora. A escavação da cave irá permitir a remoção dos materiais desta zona.

No Figura 35 é possível verificar uma ligeira variação da espessura da ZG3 em cada sondagem (Tabela 2).

#### **7.3.1.2. Zona geotécnica 2 (ZG2)**

Na Zona Geotécnica 2 (ZG2) está presente uma litologia correspondente a argilas calcárias, de tonalidade bege, e com uma espessura média de 1 m. Esta litologia apresenta uma competência mais elevada em relação à litologia da ZG3, evidenciando um valor de  $N_{SPT}$  de 60 e uma taxa de recuperação média de 50% (Tabela 30). Esta competência superior poderá traduzir-se numa escavação mais difícil. No entanto apesar desta maior competência em relação à ZG3, se forem considerados os resultados dos ensaios de laboratório realizados, verifica-se que a ZG2 não reúne as condições ótimas para servir de fundação à futura infraestrutura pretendida, devido à existência de material descomprimido e alterado, e com a presença de água que não revela um bom comportamento geotécnico.

#### **7.3.1.3. Zona geotécnica 1 (ZG1)**

A Zona Geotécnica 1 (ZG1) caracteriza-se pela presença de uma espessura considerável de calcários margosos, para profundidades maiores que 3 m, maioritariamente de tonalidade cinza podendo, no entanto, apresentar pequenas intercalações de níveis argilosos de tonalidade bege ou cinza e calcários margosos de tonalidade bege.

Na caracterização geotécnica desta zona, assim como para a ZG2, verificam-se valores de SPT de N elevados (60), no entanto o nível de recuperação é bastante diferente na ZG1, atingindo valores de aproximadamente 90% (Tabela 30).

Esta zona possui as melhores condições a nível geotécnico, constituindo a mais apta a admitir as fundações. Verificando-se, igualmente, uma maior dificuldade em proceder à escavação na ZG1.

Na Tabela 30 encontram-se as principais características de cada zona geotécnica.

**Tabela 30.** Tabela síntese.

Zona Geotécnica	ZG3	ZG2	ZG1
Litologia	Aterro/Argila	Argila, marga e calcário margoso	Calcário margoso
Profundidade média (m)	1,43	2,77	>15
Espessura média (m)	1,43	1,33	>12
N <sub>SPT</sub> mínimo a máximo	13 a 27	60 a 60	a 60
N <sub>SPT</sub> médio	33,5	60	60
Taxa de recuperação mínima a máxima	32 a 40	48 a 53	47 a 100
Taxa de recuperação média	32	50	90
RQD médio (%)	-	-	71
Grau de alteração (W)	-	W <sub>3</sub> – W <sub>5</sub>	W <sub>2</sub> – W <sub>4</sub>
Estado de Fracturação (F)	-	F <sub>4</sub> – F <sub>5</sub>	F <sub>2</sub> – F <sub>5</sub>
Aptidão geotécnica para fundação	Sem aptidão	Baixa aptidão	Boa aptidão
Ripabilidade	Elevada	Intermédia	Baixa
Método de desmonte	Métodos mecânicos ligeiros	Métodos mecânicos pesados	Métodos mecânicos pesados, incluindo martelos de elevada energia

## 8. Discussão de resultados

### 8.1. Ensaio laboratoriais

Após todos os dados apresentados, procurou-se verificar a existência de correlações entre os vários resultados dos ensaios realizados, de modo a perceber se existe alguma relação entre eles, para tal apresentam-se vários gráficos relativos a correlações entre os parâmetros físicos e mecânicos nas Figuras 36 a 43. Só foram realizados gráficos para as correlações mais elevadas em termos absolutos.

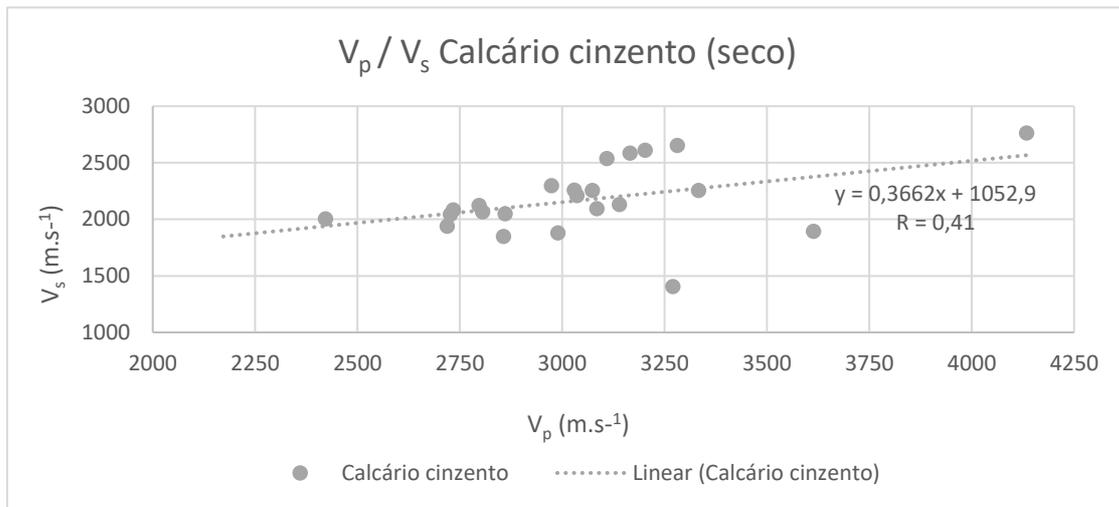
A Tabela 31 corresponde a uma tabela síntese dos resultados médios dos vários ensaios laboratoriais efetuados na presente dissertação. Através da tabela apresentada é possível inferir que o calcário cinzento apresenta valores bastante similares aos do calcário amarelo, não sendo evidente nenhuma diferença significativa (excetuando os valores do  $I_{s(50)}$  e  $V_s$  dos provetes saturados). O calcário amarelo apresentou valores ligeiramente superiores no ensaio dos ultrassons (excetuando o  $V_s$  dos saturados) porosidade e no ensaio de carga pontual. Para os restantes resultados médios dos ensaios, como o MVA, RCU determinado a partir do R, regista-se a situação inversa, o calcário cinzento apresentou valores ligeiramente superiores em relação ao calcário amarelo.

*Tabela 31 Tabela síntese dos resultados médios obtidos dos vários ensaios laboratoriais realizados.*

	Médias								
	Provetes Secos		Provetes Saturados		MVA (kg.m <sup>-3</sup> )	P (%)	I <sub>s(50)</sub> (Mpa)	RCU (MPa)	R
	V <sub>p</sub> (m.s <sup>-1</sup> )	V <sub>s</sub> (m.s <sup>-1</sup> )	V <sub>p</sub> (m.s <sup>-1</sup> )	V <sub>s</sub> (m.s <sup>-1</sup> )					
<b>Calcário amarelo</b>	3179	2478	3209	986	2493,1	9,7	4,1	28	18,3
<b>Calcário cinzento</b>	3036	2122	2974	1432	2512,8	8,9	2,7	29	20,0

Na Figura 36 apresenta-se a relação entre as  $V_p$  e as  $V_s$  correspondente às amostras de calcário cinzento secas. Observa-se uma correlação positiva entre ambas as velocidades, com o aumento das velocidades de propagação das ondas longitudinais há um paralelismo no aumento das velocidades de propagação das ondas transversais. É possível identificar alguns pontos dispersos, isto deve-se possivelmente aos problemas ocorridos expostos na metodologia do ensaio de ultrassom.

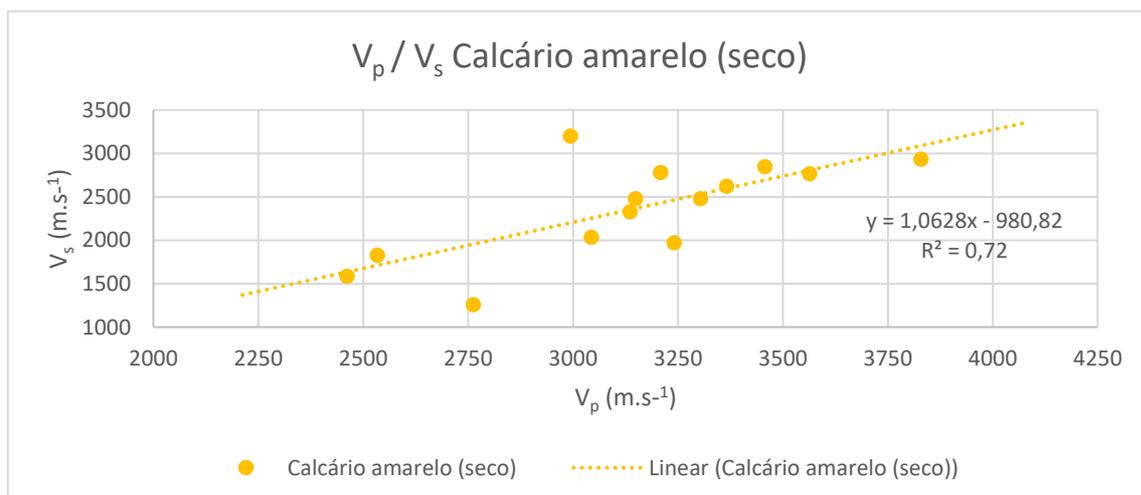
Verifica-se um coeficiente de correlação de  $R = 0,41$  estando assim perante uma correlação positiva moderada. Foram correlacionados 23 pares de valores na obtenção desta correlação.



**Figura 36** Relação entre  $V_p$  e as  $V_s$  calcário cinzento (seco).

Na Figura 37 apresenta-se a mesma correlação apresentada anteriormente, só que para este caso, encontram-se representadas as amostras de calcário amarelo seco. Os resultados obtidos são bastante similares aos obtidos anteriormente, observando-se igualmente uma correlação positiva entre ambas as velocidades, com o aumento das velocidades de propagação das ondas longitudinais há um incremento da velocidade das ondas transversais.

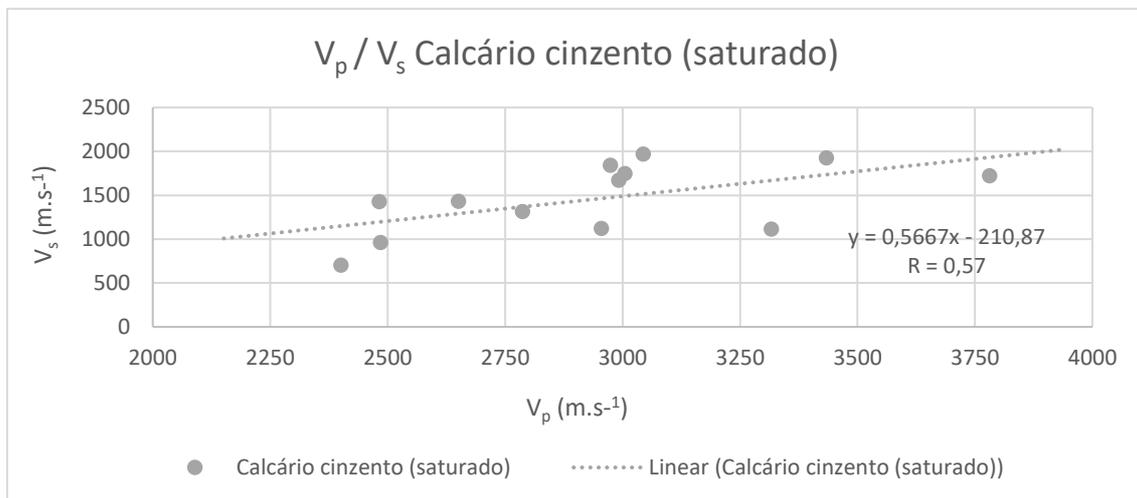
Constata-se a existência de um coeficiente de correlação de  $R = 0,72$  assim perante uma correlação positiva forte. Foram correlacionados 14 pares de valores na obtenção desta correlação.



**Figura 37** Relação entre  $V_p$  e as  $V_s$  calcário cinzento (seco).

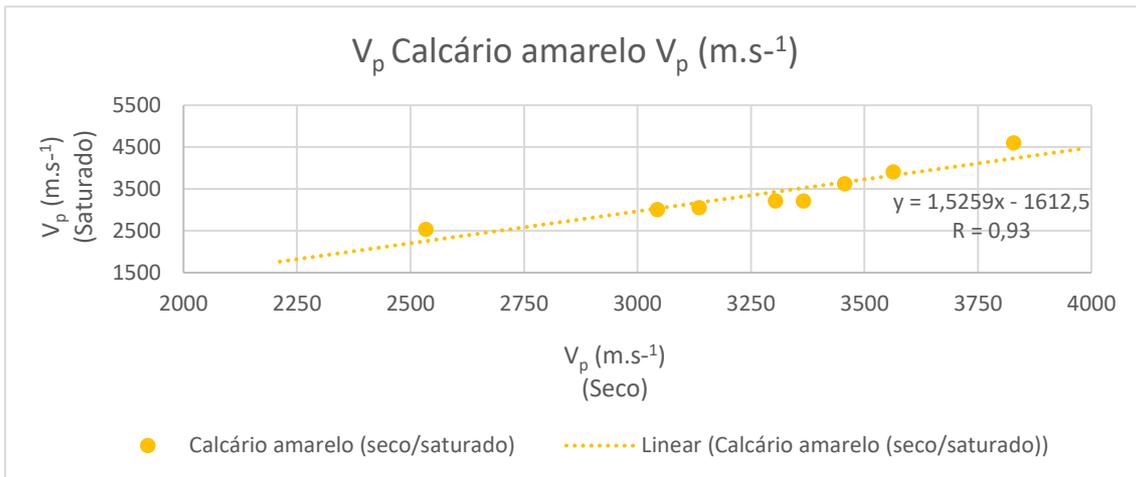
Na Figura 38 apresenta-se a relação entre as  $V_p$  com as  $V_s$  correspondente as amostras de calcário cinzento saturadas. Na representação gráfica da Figura 38, não é só possível interpretá-la como correlacioná-la à Figura 36, sendo possível inferir que houve uma diminuição mais significativa da velocidade das ondas S. O material saturado apresenta-se com  $V_s$  mais diminutas. De acordo com a Figura 38, observa-se uma correlação positiva entre as duas velocidades, com o aumento das velocidades de propagação das ondas longitudinais existe também um aumento das velocidades de propagação das ondas transversais.

Verifica-se um coeficiente de correlação de  $R = 0,57$ , estando assim perante uma correlação positiva e relativamente moderada. Para esta correlação utilizaram-se 13 pares de valores.



**Figura 38** Relação entre  $V_p$  e as  $V_s$  calcário cinzento (saturado).

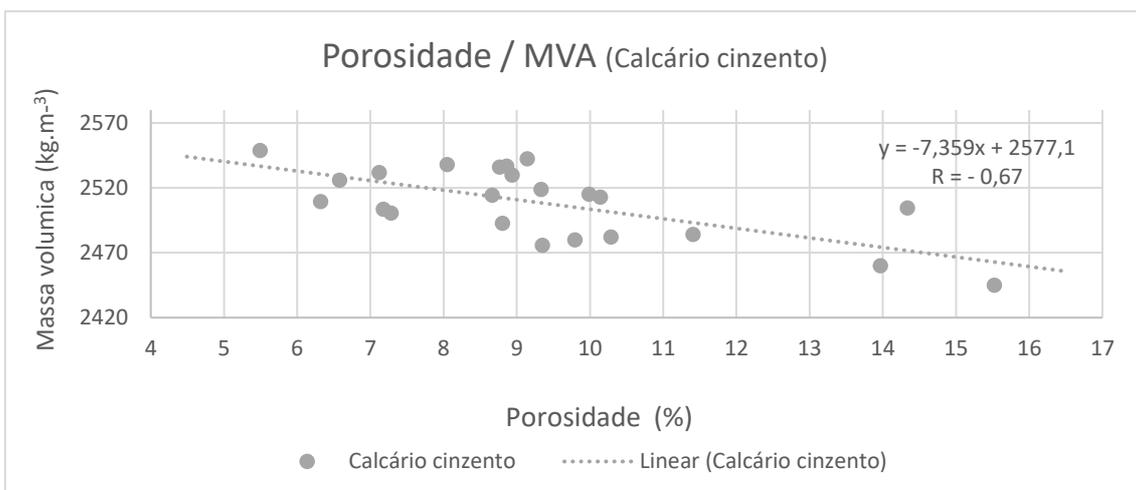
Na Figura 39 apresenta-se a relação das  $V_p$  secas com as saturadas para o calcário amarelo. Assim como em todas as representações gráficas apresentadas anteriormente, observa-se uma correlação positiva entre as duas velocidades. O destaque no gráfico da Figura 28, vai para o coeficiente de correlação que é muito elevado, apresentando um  $R = 0,93$ , estando assim perante uma correlação positiva muito forte. Foram considerados 8 pares de valores na obtenção desta correlação.



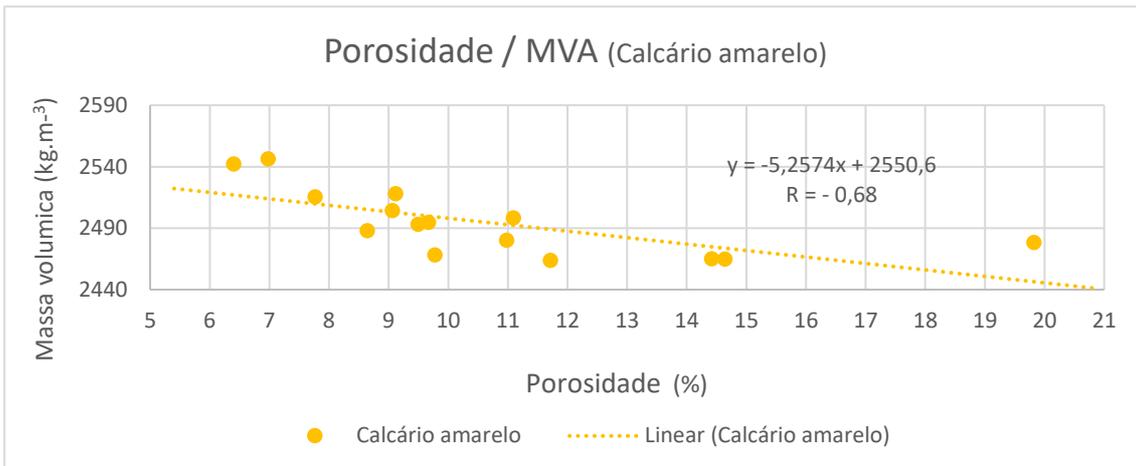
**Figura 39** Relação entre V<sub>p</sub> saturadas e as V<sub>p</sub> secas (calcário amarelo).

Nas Figuras 40 e 41 apresenta-se a relação entre a porosidade e a massa volúmica aparente para o calcário cinzento e calcário amarelo respetivamente. Há uma relação inversa nas representações gráficas das Figuras 39 e 40. Como era de se esperar quanto mais denso o material é, menos poroso ele será, sendo o que se verifica nos gráficos como se pode observar nas Figuras 39 e 40.

O coeficiente de correlação apresenta um valor *R* de - 0,67 para o calcário cinzento (Figura 40) e para o calcário amarelo um valor de *R* de - 0,68 (Figura 41). Estas duas correlações são negativas e podem ser consideradas como moderadas. Foram utilizados 23 e 15 pares de valores, respetivamente, no estabelecimento desta correlação.



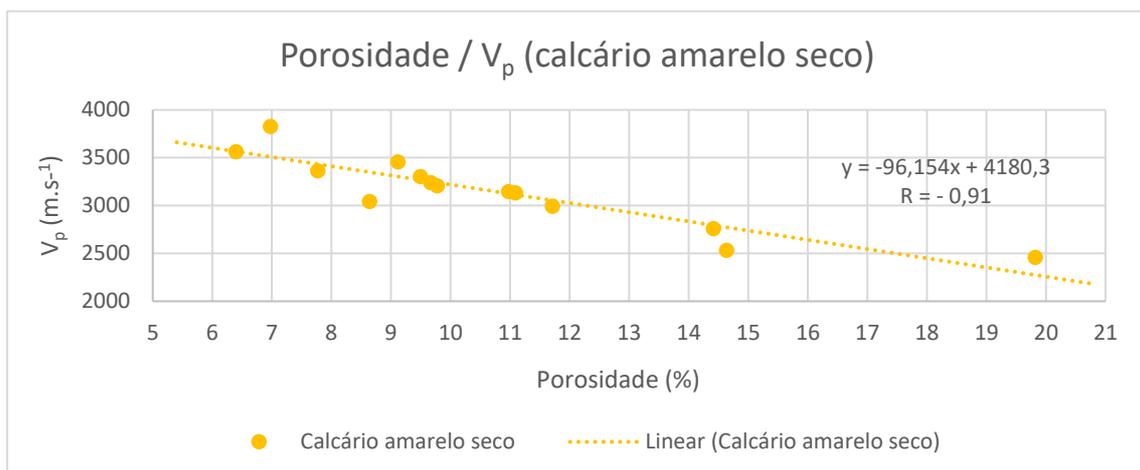
**Figura 40** Relação entre a Porosidade e a Massa Volúmica Aparente (Calcário cinzento).



**Figura 41** Relação entre a Porosidade e a Massa Volúmica Aparente (Calcário amarelo).

A representação gráfica da Figura 42 corresponde à relação entre a porosidade com a Velocidade das ondas P, para os provetes de calcário amarelo seco. Quanto menor a porosidade mais elevada será a velocidade das ondas longitudinais, de acordo com o que se verifica na Figura 42.

O coeficiente de correlação apresenta um  $R = -0,91$ , correspondendo a uma correlação negativa muito forte. Foram correlacionados 14 pares de valores respetivamente na obtenção desta correlação.



**Figura 42** Relação entre a Porosidade e a V<sub>p</sub> (Calcário amarelo seco).

Na Figura 43 é observada uma representação gráfica que correlaciona a porosidade com a absorção de água das amostras de calcário amarelo. Verifica-se uma correlação positiva, em que quanto maior é a porosidade mais elevada será a capacidade de absorção de água do material.

O coeficiente de correlação apresenta um  $R$  de 0,92, definindo-se como uma correlação positiva muito forte. Foram correlacionados 15 pares de valores na definição desta correlação.

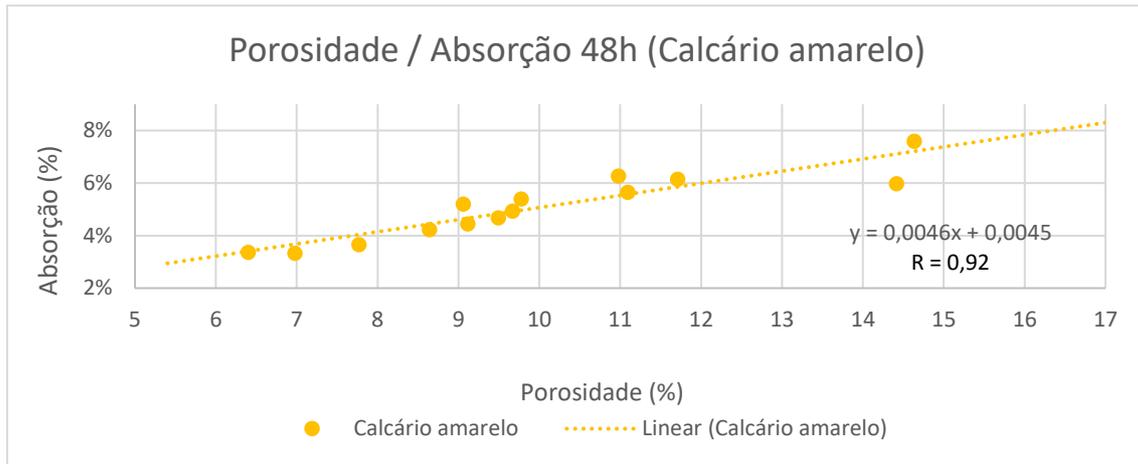


Figura 43 Relação entre a Porosidade e a Absorção (Calcário amarelo).

Na Tabela 32 são apresentadas várias correlações que foram estabelecidas no presente trabalho, destacando-se como correlações muito fortes as seguintes: calcário amarelo  $V_p$  seco/saturado; calcário amarelo Porosidade/absorção de água; calcário amarelo seco Porosidade/ $V_p$ :

*Tabela 32* Coeficientes de correlação de R obtidos.

<b>Correlação</b>	<b>Coefficiente de correlação de R</b>	<b>Nº de pares de valores utilizados na correlação.</b>
Calcário amarelo $V_p$ seco/saturado	0,93	8
Calcário amarelo Porosidade/absorção	0,92	14
Calcário cinzento $V_p/V_s$ seco/ $V_p/V_s$ saturado	0,77	26
Calcário amarelo seco $V_p/V_s$	0,72	14
Calcário cinzento saturado $V_p/V_s$	0,57	13
Calcário cinzento seco $V_p/V_s$	0,41	23
Calcário cinzento Porosidade/absorção	0,39	19
Calcário cinzento $V_p$ seco/saturado	0,38	13
Calcário cinzento $V_p/V_s$ seco/saturado	0,35	13
Calcário cinzento S/P seco/saturado	0,17	13
Is(50)/RCU calcário cinzento	0,07	8
Calcário cinzento seco Porosidade/ $V_s$	-0,14	23
Calcário cinzento $V_s$ seco/saturado	-0,14	13
Is(50)/RCU calcário amarelo	-0,22	6
Calcário cinzento saturado Porosidade/ $V_p$	-0,34	13
Calcário cinzento seco Porosidade/ $V_p$	-0,43	23
Calcário cinzento saturado Porosidade/ $V_s$	-0,65	13
Calcário amarelo seco Porosidade/ $V_s$	-0,67	14
Porosidade/MVA calcário cinzento	-0,67	23
Porosidade/MVA calcário amarelo	-0,68	23
Calcário amarelo seco Porosidade/ $V_p$	-0,91	14

## 8.2. Recomendações Geotécnicas

Face ao mencionado no Capítulo 7.3., pode inferir-se, excetuando a ZG3, que em profundidade existe uma alternância semelhante em termos litológicos, que se caracteriza por ser calco-margosa. Em profundidade, a presença de material argiloso diminui, verificando-se a existência de bancadas bastante espessas de calcário margoso.

A ZG1 apresenta-se como a zona geotécnica de melhor aptidão, uma vez que corresponde ao maciço rochoso. Há uma maior homogeneidade na ZG1, encontrando-se várias zonas compactas de calcário margoso. A ZG2 apresenta características semelhantes à ZG1, apresentando características geotécnicas intermédias, no entanto, há uma maior presença de margas tornando esta Zona Geotécnica de menor resistência e que se caracteriza como sendo uma zona margosa, com a presença de calcários margosos, enquanto a ZG1 corresponde a uma zona predominantemente de calcários margosos.

O nível de água, na maior parte dos furos de sondagem realizados, foi encontrado a uma profundidade média de 3 m (Tabela 3), demasiado perto da superfície tendo em conta as características do projeto, no qual se prevê a implementação de uma cave. Deste modo recomenda-se a utilização de drenos por baixo do pavimento da cave, que permitam encaminhar as águas de infiltração para o sistema de águas pluviais. De referir que o nível de água nas sondagens pode não significar um grande afluxo de água no decorrer da escavação ou da operação do edifício. Com um nível freático adequado às condições exigidas pelas características da obra, o local estará seco e seguro para suportar a estrutura. Este processo promove ainda uma melhora na estabilidade dos solos e dos taludes melhorando a estabilidade para a base da obra.

Atendendo às características do local as fundações diretas seriam uma boa solução a adotar. Este tipo de fundação transmite a carga da construção ao terreno pela base. Assim, as cargas estruturais são transferidas a uma camada de terreno com capacidade de carga adequada por se tratar de um maciço rochoso e de uma estrutura de apenas uma cave e dois pisos elevados. Visto que o material mais superficial não reúne as condições desejadas para a implementação das fundações a sua remoção durante a escavação para a implantação da cave, irá ultrapassar as limitações que a ZG3 e a ZG2 colocariam na realização das fundações.

O material a ser escavado apresentará comportamentos distintos. O material constituinte da ZG3, será de fácil escavação, não necessitando de meios mecânicos pesados, podendo ser utilizada uma retroescavadora acoplada de uma pá. Há que ter em atenção que a

existência de blocos de rocha das fundações dos edifícios antigos irá colocar dificuldades no desmonte pois confere enorme heterogeneidade à ZG3. Já o mesmo não se verifica para a ZG2 e, em especial a ZG1, onde será necessário recorrer a meios mecânicos pesados, como uma escavadora giratória equipada se necessário de martelo de elevada energia.

Concluindo o estudo geológico-geotécnico é possível determinar e caracterizar 3 zonas geotécnicas distintas, uma mais próxima da superfície do terreno (ZG3) constituída por material de aterro e argilas, apresentando-se assim como a zona geotécnica menos competente. A ZG2 é constituída por argilas e margas calcárias transitando para calcários margosos (ZG1). Estas 2 zonas geotécnicas apresentam boa competência geotécnica, sendo que a ideal, pelas suas características, corresponde à ZG1. Estando assim perante 3 litologias diferentes: material de aterro, argilas e margas calcárias e calcários margosos.

## 9. Conclusões

Estando perante 3 litologias diferentes: material de aterro, argilas e margas calcárias e calcários margosos, o estudo geológico-geotécnico apresentado no Capítulo 7.3. permitiu determinar e caracterizar 3 zonas geotécnicas. A zona mais superficial (ZG3) é constituída por material de aterro e argilas, sendo a zona geotécnica menos competente. A ZG2 é constituída por argilas e margas calcárias transitando para os calcários margosos da ZG1. Estas 2 últimas zonas geotécnicas apresentam boa competência geotécnica, sendo que a melhor, pelas suas características, corresponde à ZG1. Tendo em conta as características mencionadas das zonas geotécnicas recomenda-se o recurso a fundações diretas, por sapatas, preferencialmente na ZG1, pois a escavação para a cave irá remover a generalidade dos materiais com piores características das ZG3 e ZG2.

Para além do estudo geológico-geotécnico apresentam-se os resultados dos vários ensaios realizados de caracterização física e mecânica dos materiais rochosos presentes na área de estudo, ensaios esses que possibilitam as conclusões seguintes:

- A porosidade aberta média dos calcários margosos cinzentos e amarelos, apresenta valores de 9,0% e 9,7% e, de acordo com a IAEG (1979), é classificada como média. A massa volúmica aparente dos calcários margosos é definida como média, tanto para os de coloração cinzenta como amarela, verificando-se uma massa volúmica aparente média de  $2513 \text{ kg.m}^{-3}$ , para os primeiros, e de  $2493 \text{ kg.m}^{-3}$ , para os segundos.

- As velocidades de propagação dos ultrassons para as ondas longitudinais no calcário cinzento, no estado seco, têm velocidades que variam entre  $2719 \text{ m.s}^{-1}$  e  $4134 \text{ m.s}^{-1}$ , enquanto para as ondas transversais as velocidades são menores e variam entre  $1405 \text{ m.s}^{-1}$  e  $2764 \text{ m.s}^{-1}$ . Tendo em atenção a classificação da IAEG (1979), para a velocidade média das ondas longitudinais, o calcário cinzento seco classifica-se como de baixa velocidade ( $3036 \text{ m.s}^{-1}$ ).

- A velocidade de propagação das ondas longitudinais das amostras de calcário amarelo, no estado seco varia entre  $2462 \text{ m.s}^{-1}$  e  $3829 \text{ m.s}^{-1}$  e para as ondas transversais varia entre  $1257 \text{ m.s}^{-1}$  e  $3196 \text{ m.s}^{-1}$ . Segundo a classificação da IAEG (1979), para a velocidade média das ondas longitudinais, o calcário amarelo seco apresenta uma velocidade baixa ( $3179 \text{ m.s}^{-1}$ ).

- No estado saturado a velocidade de propagação das ondas longitudinais das amostras de calcário cinzento varia entre  $2401 \text{ m.s}^{-1}$  e  $3781 \text{ m.s}^{-1}$  (baixa velocidade média  $2974 \text{ m.s}^{-1}$ ), e para as ondas transversais varia entre  $704 \text{ m.s}^{-1}$  e  $1970 \text{ m.s}^{-1}$ .

- Nas amostras saturadas de calcário amarelo, a velocidade de propagação das ondas longitudinais varia entre  $2534 \text{ m.s}^{-1}$  e  $4598 \text{ m.s}^{-1}$  (velocidade média baixa de  $3209 \text{ m.s}^{-1}$ ) e para as ondas transversais varia entre  $642 \text{ m.s}^{-1}$  e  $3691 \text{ m.s}^{-1}$ .

- Através do ensaio de resistência à carga pontual pode-se classificar a resistência do maciço rochoso, de acordo com a classificação de Bieniawski (1979), como elevada para o calcário cinzento (valor médio de  $I_{s(50)} = 2,75 \text{ MPa}$ ) e de muito elevada para o calcário amarelo (valor médio de  $I_{s(50)} = 4,1 \text{ MPa}$ ). Os valores obtidos nos provetes saturados foram substancialmente menores, principalmente no calcário amarelo, que apresentou um valor médio de  $I_{s(50)} = 1,06 \text{ MPa}$ , classificando-se segundo Bieniawski (1979) como de resistência baixa, assim como o e para o calcário cinzento com um valor médio de  $I_{s(50)} = 1,51 \text{ MPa}$ , ambos classificados como apresentando resistência baixa. Com a saturação o calcário amarelo registra uma maior perda de resistência média de  $I_{s(50)}$ .

- A resistência à compressão uniaxial estimada através da dureza de Schmidt, apresentou um valor médio para o calcário cinzento de  $29 \text{ MPa}$  e para o calcário amarelo um valor médio de  $28 \text{ MPa}$ . Registam-se diferenças em termos quantitativos da resistência do material rochoso, quando se consideram os valores médios de  $I_{s(50)}$  e da resistência à compressão uniaxial definida pela dureza de Schmidt. As diferenças podem estar relacionadas com a fragmentação apresentada pelo material rochoso na realização dos ensaios com o martelo de Schmidt que não se verificou nos ensaios do Point Load Test. Nos ensaios com o esclerómetro de Schmidt, a força aplicada é de compressão, enquanto no Point Load Test as forças atuantes são essencialmente de tração.

- No ensaio de Slake Durability Test, segundo a classificação de Gamble (1971), para o 2º ciclo, classifica-se a durabilidade como muito alta tanto para o calcário cinzento como para o calcário amarelo, registrando-se valores de índice de durabilidade médios de  $98,28\%$  e  $98,13\%$ , respetivamente.

- Os valores calculados para o RMR variam entre 65 e 77 nos calcários cinzentos, o que corresponde a um maciço rochoso de boa qualidade.

- O calcário amarelo apresentou valores de RMR entre os 25 a 69, podendo considerar-se essencialmente como maciço regular (41 - 60), mas podendo apresentar pontualmente características de maciço pobre (21 - 41), ou por outro lado de maciço bom (61 - 80).

Os resultados obtidos nos vários ensaios e o comportamento do material aquando da realização dos mesmos, permitiu evidenciar algumas características que ajudaram a compreender a variação das suas propriedades que estão, muitas vezes, relacionadas com processos de alteração associados às suas características margosas. A água evidenciou-se como

o principal fator de alteração e de modificação do comportamento do material rochoso, que não se encontrando *in situ* e estando descomprimido, expande e perde resistência quando molhado, sofrendo mais facilmente situações de fratura e desagregação. As margas existentes no material rochoso têm um comportamento expansivo na presença de água devido à expansibilidade das argilas, fazendo com que o material expanda e se fracture preferencialmente pelas discontinuidades existentes, com particular intensidade segundo os planos de estratificação. Na Figura 43 é possível observar esse comportamento após molhagem, situação esta que ocorreu num número significativo dos provetes, principalmente nas amostras de calcário amarelo.



**Figura 44** Imagem ilustrativa do estado dos provetes após expostos à água.

O material amarelo, de aparência mais alterada, tem por vezes comportamentos contrários aos esperados, isto pode ser explicado pela oxidação e outros processos de alteração a que o material foi sujeito. Os processos de alteração podem também “cimentar” o material rochoso e preencher as suas fissuras, podendo fornecer uma maior resistência, bem como a modificação da tonalidade cinzenta para amarela devido à oxidação.

De acordo com os valores obtidos por Faim (2014), verificou-se que os alguns dos coeficientes de correlação, obtidos para os parâmetros físicos e mecânicos dos calcários dolomíticos das Camadas de Coimbra, são bastante semelhantes aos encontrados na presente dissertação, concretamente a velocidade das  $V_s$  com as  $V_p$ , no qual Faim obteve um coeficiente

de correlação (R) de 0,75 assemelhando-se ao coeficiente de correlação obtido para o calcário amarelo seco das  $V_s$  com as  $V_p$  ( $R = 0,72$ ).

A partir do zonamento geotécnico realizado, associado aos resultados dos vários ensaios é possível uma melhor compreensão do material rochoso, assim como do maciço de fundação. Ficou evidente que o calcário margoso, apesar de ser uma rocha que genericamente apresenta qualidade média, sofre degradação significativa com a descompressão e molhagem, pelo que em obra deverá ser tido em conta este comportamento, evitando que as zonas escavadas para as fundações sejam expostas à molhagem, de modo a evitar a degradação das características dos calcários em resultado dos mecanismos de expansão. A molhagem deve ser totalmente evitada pois os calcários margosos expandem rapidamente nesta condição. Caso a molhagem se venha a verificar, recomenda-se a proteção das zonas de fundação e a remoção dos volumes degradados anteriormente às operações de construção, de modo a garantir boas condições de fundação.

## Referências bibliográficas

- Ahmed, Tared H. (1946). Reservoir engineering handbook. Second Edition. Previously copyrighted 2000 by Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- Andrade, P. G. C. S. (2021). Apresentações das aulas de Estabilidade de Taludes (não publicado). Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Andrade, P.G.C.S (2014). Estudo das principais características das descontinuidades. Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Deere, D.U. and Deere, D.W. 1988. The rock quality designation (RQD) index in practice. In Rock classification systems for engineering purposes, (ed. L. Kirkaldie), ASTM Special Publication 984, 91-101. Philadelphia: Am. Soc. Test. Mat.
- Deere, D. U. and Miller, R. P. (1966). Engineering classification and index properties of rock. Technical Report No. AFNL-TR-65.116. Albuquerque, NM: Air Force Weapons Laboratory.
- Bieniawski, Z.T. 1976. Rock mass classification in rock engineering. In Exploration for rock engineering, proc. of the symp., (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 97-106. Cape Town: Balkema.
- Bieniawski, Z.T. 1989. Engineering rock mass classifications. New York: Wiley.
- Bieniawski, Z.T. (1975) - "The point-load test in geotechnical practice". Engineering Geology, 9, pp. 1- 11.
- CEN prEN 1936 (1997) – "Methods of test for natural stone units – determination of real density and apparent density, and of total and open porosity".
- CMC. (2007) – Plano Estratégico de Coimbra – Enquadramento Geo-estratégico. Revisão 01.
- CMC. (2021) – Áreas de reabilitação de Coimbra; Área empresarial da Pedrulha, Área empresarial de Cernache. Proposta de delimitação.
- Costa, D.; and Andrade, P. S. (2020) – "Caracterização de taludes localizados na área de Coimbra". Comunicações Geológicas (2020) 107, Especial I, 149-151.
- Cunha, L.; and Almeida, A. C.; (2008) – "António Ferreira Soares e a Geomorfologia do Baixo Mondego". A Terra: conflitos e ordem. Universidade de Coimbra.
- Cunha, L.; Soares, A. F.; Tavares, A.; Marquês, J. F. - O Julgamento Geomorfológico de Coimbra – O testemunho dos depósitos quaternários. Actas do I colóquio de Geografia de Coimbra; Nº Especial de "Cadernos de Geografia", pp. 15-26
- Duarte, L. V.; and Soares, A. F. (2002) – "Litostratigrafia das séries margo-calcárias do Jurássico Inferior da Bacia Lusitânica (Portugal)". Comum. Inst. Geol. e Mineiro, 2002, t. 89, pp. 135-154.
- Faim, R. L. S.; (2014) – Caracterização geotécnica dos calcários dolomíticos das camadas de Coimbra. Departamento de Ciências da Terra da FCTUC.
- Franklin, J. A.; Chandra, R. (1972) – "The Slake Durability Test". Int. J. Rock Mechanics and Mining Science. Vol. 9, pp. 325-341.

FERREIRA, B. D. C. (2012) – “Arquitetura industrial em Coimbra no século XX – A zona industrial da Pedrulha”. Departamento de Arquitetura da FCTUC.

Soares, A. F.; Marquês, J. F.; Sequeira, A. J. D.; (2007) – Notícia explicativa da folha 19-D Coimbra-Lousã – Instituto Nacional de Engenharia Tecnologia e Inovação, Lisboa.

Hoek, E.; Bray, J. W. (1981) - Rock Slope Engineering. The Institution of Mining and Metallurgy. London.

IAEG (1979) – “Classification of rocks and soils for engineering geological mapping”, Part 1 – rock and soils materials. Bulletin of the International Association Engineering Geology.

ISRM (1977). Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 16, 141-156pp.

ISRM (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 15, 319 - 368p

ISRM (1978) – Suggested Method For Determination Of The Schmidt Rebound Hardness, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, Vol. 15, No 3, pp 89-97.

ISRM (1981) - Rock Characterization Testing & Monitoring. ISRM Suggested Methods. Ed. E. T. Brown. Published for the Commission on Testing Methods. Pergamon Press, Oxford.

ISRM (1981) – Basic Geotechnical Description of Rock Masses.

ISRM (1985) - Suggested Method for Determining Point Load Strength. Int. J. Rock Mechanics and Mining Science and Geomech, 22 (2), pp. 51-60.

ISRM (1999) – “Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression”. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.36, pp.279-289.

Katz, O.; Reches, Z.; Roegiers, J-C. (2000) - Evaluation of Mechanical Rock Properties using a Schmidt Hammer. Int. J. Rock Mechanics and Mining Science and Geomech. Technical Note. 37, pp. 723-728.

Kullberg, J. C.; Rocha R. B.; Soares A. F.; Rey J.; Terrinha P.; Azerêdo A. C.; Callapez P.; Duarte, L.V.; Kullberg M. C.; Martins L.; Miranda J. R.; Alves C.; Mata J.; Madeira J.; Mateus O.; Moreira M. & Nogueira C. R. (2013). A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. Geologia de Portugal, Volume II – Geologia Meso-cenozoica de Portugal. Lisboa: Escolar Editora.

KULLBERG, J. C. (2000) -"Evolução tectónica mesozóica da Bacia Lusitaniana". Tese Doutoramento, Universidade Nova Lisboa, 361 p.

Leong, E.; Yeo, S.; Rahardjo, H. (2004). Measurement of Wave Velocities and Attenuation using an Ultrasonic Test System. Can. Geotech. J.41, pp 844-860.

NP EN 1925:2000, Norma Portuguesa. Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade. Instituto Português da Qualidade. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

NP (2008). Norma portuguesa. Métodos de ensaio para pedra natural – Determinação das massas volúmicas real e aparentes e das porosidades total e aberta. CEN.

NP EN 14579:2007, Norma Portuguesa. Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da velocidade de propagação do som. Caparica: Instituto Português da Qualidade.

Reis, R. C. P.; (2018) – “Caracterização físico-mecânica de rochas para fins geotécnicos”. Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território.

Rosa, D. S.; and Silva, P. C.; and Barros, W. O.; Rocha, M. M. M. (2020) – “Rebaixamento de lençol freático – análise do método executivo empregado na construção da ETE Santinho em Ribeirão das Neves”. Revista Paramétrica. Vol. 12, Nº 13, Ano 2020.

Terzaghi, et al., (1996) Soil Mechanics in Engineering Practice. 3rd Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York.

Vallejo, L. G.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C. (2002) – Ingeniería Geológica. Prentice Hall.

## **Anexos**

**Anexo I – Resultado dos ensaios de ultrassom**

	Secas		Saturadas	
	Ondas P m/s 24 kHz	Ondas S m/s 250 kHz	Ondas P m/s 24 kHz	Ondas S m/s 250 kHz
<b>Calcário cinzento</b>				
(2) B S4 12m 7	3109	2538	3317	1116
(3) B S4 9m 3	2734	2083	2955	1122
B S4 10.5m 5	3203	2611	2651	1432
(2) B S4 10,5m 5	3030	2258	2401	704
B S4 12m 6	3085	2093	2485	962
B S4 9m 4	3281	2654	3434	1929
B S4 9m 3	3140	2130	3781	1723
(2) B S4 9m 3	3036	2211	2787	1318
B S4 12m 7	2857	1848	*	*
(3) B S4 10,5m 5	4134	2764	*	*
(2) B S4 12m 6	3166	2586	*	*
(2) B S6 9m 15	2719	1939	2482	1430
(2) B S6 13.5m 20	3270	1405	2974	1842
B S4 7.5m 2	2806	2067	*	*
B S5 13.5m 13	3074	2254	3044	1970
B S6 12m 17	3614	1893	*	*
(2) B S5 12m 10	2727	2042	*	*
B S5 12m 11	2797	2122	*	*
B S4 7.5m 1	2422	2003	*	*
(2) B S5 13.5m 13	2974	2297	2992	1672
B S5 12m 10	2861	2049	*	*
B S6 9m 15	2990	1879	3005	1748
B S6 13.5m 20	3333	2256	*	*
Média	3036	2122	2974	1432
Desvio Padrão	339	304	385	382
<b>Calcário amarelo</b>				
S5 9m 12	3304	2478	3209	801
S5 3m 10	3829	2934	4598	1031
(2) S6 0m 13	3136	2327	3049	854
S4 3m 2	3457	2843	3625	941
S5 3m 8	2534	1827	2534	642
S4 6m 5	2762	1257	*	*
S6 6m 15	3209	2780	*	*
S6 4.5m 14	2462	1583	*	*
(2) S5 6m 11	3241	1970	*	*

Caracterização Geológica-Geotécnica de Terrenos de Fundação Calco-Margosos

S4 6m 6	3149	2477	*	*
S5 6m 11	3564	2762	3902	3691
S5 3m 9	3044	2032	3005	1819
S4 3m 3	3366	2620	3208	2201
S4 6m 7	2994	3196	*	*
S6 0m 13	*	*	*	*
Média	3179	2477,5	3208,5	986
Desvio Padrão	363,3	538,5	595,8	972,6

\* amostra destruída ou danificada

## Anexo II – Resultado dos ensaios de Massa volúmica aparente e Porosidade aberta

Calcário cinzento	Peso (g)			P (%)	MVA (kg.m <sup>-3</sup> )
	Saturado	Submerso	Seco		
(2) B S4 12m 7	1014,78	616,45	978,36	9,1	2542,5
(3) B S4 9m 3	1115,75	667,5	1064,61	11,4	2484,1
B S4 10.5m 5	941,6	571,05	909,12	8,8	2536,0
(2) B S4 10,5m 5	1019,26	614,44	978,21	10,1	2512,8
B S4 12m 6	949,3	572,52	916,66	8,7	2514,5
B S4 9m 4	946,32	574,02	913,32	8,9	2536,7
B S4 9m 3	1513,75	918,5	1465,84	8,0	2538,0
(2) B S4 9m 3	1176,12	710,12	1132,63	9,3	2518,8
B S4 12m 7	979,89	589,42	923,9	14,3	2504,5
(3) B S4 10,5m 5	793,66	478,74	762,21	10,0	2515,2
(2) B S4 12m 6	923,26	559,03	890,71	8,9	2529,8
(2) B S6 9m 15	1244,14	743,89	1192,68	10,3	2482,1
(2) B S6 13.5m 20	952,35	571,06	918,77	8,8	2492,7
B S4 7.5m 2	1466,66	892,39	1435,12	5,5	2548,8
B S5 13.5m 13	1194,84	719,66	1164,81	6,3	2509,5
B S6 12m 17	1596,21	965,54	1554,7	6,6	2525,9
(2) B S5 12m 10	1048,53	623,15	989,11	14,0	2460,0
B S5 12m 11	983,6	587,11	946,52	9,4	2475,8
B S4 7.5m 1	921,8	545,55	863,38	15,5	2445,1
(2) B S5 13.5m 13	1884,7	1132,52	1829,9	7,3	2500,6
B S5 12m 10	1772,8	1059,36	1702,93	9,8	2479,9
B S6 9m 15	1363,33	819,87	1324,31	7,2	2503,6
B S6 13.5m 20	1456,03	882,11	1415,15	7,1	2531,9
Média	1048,53	623,15	989,11	9	2513
Desvio Padrão				2,97	26,88

<b>Calcário amarelo</b>					
S5 9m 12	780,04	467,78	750,39	9,5	2493,1
S5 3m 10	747,06	454,25	726,63	7,0	2546,2
(2) S6 0m 13	725,74	435,83	693,58	11,1	2498,3
S4 3m 2	739,21	446,22	712,5	9,1	2517,9
S5 3m 8	883,08	525,52	830,74	14,6	2464,8
S4 6m 5	1339,82	797,41	1261,62	14,4	2465,2
S6 6m 15	771,21	459,39	740,72	9,8	2468,3
S6 4.5m 14	1117,19	667,3	1028	19,8	2478,3
(2) S5 6m 11	740,14	444,06	711,51	9,7	2494,8
S4 6m 6	1047,94	626,24	1001,64	11,0	2480,1
S5 6m 11	797,07	484,16	777,04	6,4	2542,2
S5 3m 9	1100,26	658,89	1062,11	8,6	2487,8
S4 3m 3	931,01	561,64	902,31	7,8	2515,5
S4 6m 7	755,15	449,25	719,32	11,7	2463,7
S6 0m 13	767,12	461,42	739,42	9,1	2504,4
<b>Média</b>	780,04	467,78	750,39	9,7	2493,1
<b>Desvio Padrão</b>				3,3	25,8

### Anexo III – Resultado do ensaio de Point Load Test (amostras secas)

Calcário cinzento	Amostra	D (cm)	Comprimento da amostra (cm)	Carga (kN)	$D_e^2$	$I_s$	$D_e$	F	$I_{s(50)}$
	B S4 12m 7	6,17	13,6	3	2,804	10,701	1,674	0,217	<b>2,32065854</b>
	B S4 10.5m 5	6,17	12,3	1,36	2,804	4,851	1,674	0,217	<b>1,05203187</b>
	B S4 9m 4	6,17	12,5	2	2,804	7,134	1,674	0,217	<b>1,54710569</b>
	(2) B S4 12m 7	6,17	13,4	2,1	2,804	7,491	1,674	0,217	<b>1,62446098</b>
	(3) B S4 9m 3	6,17	14,6	0,85	*	*	*	*	*
	(2) B S4 10,5m 5	*	13,3	*	*	*	*	*	*
	B S4 12m 6	6,17	12,4	6,4	2,804	22,828	1,674	0,217	<b>4,95073822</b>
	B S4 9m 3	6,17	20	6	2,804	21,401	1,674	0,217	<b>4,64131708</b>
	(2) B S4 9m 3	6,17	10,5	3,7	2,804	13,198	1,674	0,217	<b>2,86214553</b>
	(3) B S4 10,5m 5	*	10,3	*	*	*	*	*	*
	(2) B S4 12m 6	6,17	12	1,9	2,804	6,777	1,674	0,217	<b>1,46975041</b>
	(2) B S6 9m 15	6,15	17,1	3,15	2,799	11,254	1,673	0,217	<b>2,43975904</b>
	(2) B S6 13.5m 20	6,04	13,8	2,4	2,774	8,652	1,665	0,216	<b>1,8719098</b>
	B S4 7.5m 2	6,16	14,9	3,5	2,801	12,494	1,674	0,217	<b>2,70913725</b>
	B S5 13.5m 13	6,16	15,8	5	2,801	17,849	1,674	0,217	<b>3,87019608</b>
	B S6 12m 17	6,09	17,2	5,1	2,785	18,310	1,669	0,217	<b>3,96512119</b>
	(2) B S5 12m 10	6,18	14,7	5,5	2,806	19,602	1,675	0,217	<b>4,25187164</b>
	B S5 12m 11	6,15	12,6	3,6	2,799	12,862	1,673	0,217	<b>2,78829605</b>
	B S4 7.5m 1	*	12,5	*	*	*	*	*	*
(2) B S5 13.5m 13	6,12	25,4	2,9	2,792	10,386	1,671	0,217	<b>2,25038753</b>	
B S5 12m 10	6,12	24,2	3,7	2,792	13,251	1,671	0,217	<b>2,87118408</b>	

	B S6 9m 15	6,16	18,3	9	2,801	32,128	1,674	0,217	6,96635294
	B S6 13.5m 20	6,01	20,3	10,5	2,767	37,948	1,663	0,216	8,20542218
	Média	6,2		3,55					2,75
Calcário amarelo	S5 9m 12	6,01	11,2	5,5	2,767	19,877	1,663	0,216	4,29807829
	S5 3m 10	6,02	10,3	12	2,769	43,333	1,664	0,216	9,37158602
	(2) S6 0m 13	5,78	11,1	6	2,713	22,112	1,647	0,215	4,76024936
	S4 3m 2	5,8	11,2	6	2,718	22,074	1,649	0,215	4,75388195
	S5 3m 8	6,01	12,9	5	2,767	18,070	1,663	0,216	3,9073439
	S4 6m 5	6,16	13,8	*	*	*	*	*	*
	S6 6m 15	6	11,2	1,25	2,765	4,521	1,663	0,216	0,97746653
	S6 4.5m 14	*	17,1	*	*	*	*	*	*
	(2) S5 6m 11	6,04	10,5	4,7	2,774	16,944	1,665	0,216	3,66582336
	S4 6m 6	6,16	14,2	4,4	2,801	15,707	1,674	0,217	3,40577255
	S5 6m 11	6,11	10,3	4,7	2,790	16,847	1,670	0,217	3,64949169
	S5 3m 9	5,74	16,5	7	2,704	25,887	1,644	0,215	5,56858908
	S4 3m 3	5,9	13,6	4,8	2,742	17,509	1,656	0,216	3,77799669
	S4 6m 7	6,16	9,7	2,85	2,801	10,174	1,674	0,217	2,20601176
	S6 0m 13	5,82	*	*	*	*	*	*	*
	Média	6,0		5,35					

\* amostra destruída ou danificada

#### Anexo IV – Resultado do ensaio de Point Load Test (amostras saturadas)

Amostras saturadas										
		D (cm)	Comprimento da amostra (cm)	Carga (kN)	$D_e^2$	$I_s$	$D_e$	F	$I_{s(50)}$	
Calcário cinzento	B S4 9m 4	6,17	16,5	1,95	2,80	6,96	1,67	0,217	1,51	
	B s6 3m 10	6,17	14,5	2,8	2,80	9,99	1,67	0,217	2,17	
	B S5 12m 7	6,17	9	0,7	2,80	2,50	1,67	0,217	0,54	
	B S5 13.5m 5	6,18	20	3,8	2,81	13,54	1,68	0,217	2,94	
	B S5 13.5m 5 (2)	6,18	11,5	4,3	2,81	15,33	1,68	0,217	3,32	
	B S5 13.5m 5 (3)	6,18	8,5	1,3	2,81	4,63	1,68	0,217	1,00	
	B S6 12m 9	6,17	16	3,5	2,80	12,48	1,67	0,217	2,71	
	B S6 12m 9 (2)	6,17	8,5	1,9	2,80	6,78	1,67	0,217	1,47	
	B S6 13.5m 8	5,79	11,5	1,2	2,72	4,42	1,65	0,215	0,95	
	B S5 12m 6	6,18	12	2,45	2,81	8,73	1,68	0,217	1,89	
	B S4 13.5m 1	6,18	11	0,55	2,81	1,96	1,68	0,217	0,43	
	Média				1,95					1,51
	Desvio padrão									0,77
	CV									0,51
Calcário amarelo	S5 3m 4	6,08	13,5	2	2,78	7,19	1,67	0,217	1,56	
	S4 3m 1	5,99	13,5	1,3	2,76	4,71	1,66	0,216	1,02	
	S4 3m 1 (2)	5,99	8	1,25	2,76	4,53	1,66	0,216	0,98	
	S5 9m 13	6,04	11	0,35	2,77	1,26	1,67	0,216	0,27	

Caracterização Geológica-Geotécnica de Terrenos de Fundação Calco-Margosos

S5 9m 13 (2)	6,04	6,5	4,35	2,77	15,68	1,67	0,216	<b>3,39</b>
S4 3m 15	5,81	8,5	1,4	2,72	5,15	1,65	0,215	<b>1,11</b>
S5 3m 14	5,93	8	1,7	2,75	6,19	1,66	0,216	<b>1,34</b>
S7 3m 22	6,16	14	0,9	2,80	3,21	1,67	0,217	<b>0,70</b>
S9 3m 25	5,93	10	1,4	2,75	5,09	1,66	0,216	<b>1,10</b>
S9 3m 29	5,92	11	1	2,75	3,64	1,66	0,22	<b>0,79</b>
Média			1,4					<b>1,06</b>
Desvio padrão								<b>0,12</b>
CV								<b>0,12</b>

**Anexo V – Resultado do ensaio de absorção**

	Amostra	0h (seco) (g)	0h/0h	1h (g)	1h/0h	2h (g)	2h/0h	24h (g)	24h/0h	48h (g)	48h/0h
Calcário cinzento	B S4 12m 7	366,46	0%	373,75	2,0%	375,92	2,6%	385,7	5,3%	386,92	5,6%
	B S4 10.5m 5	466,91	0%	472,19	1,1%	474,5	1,6%	484,55	3,8%	488,87	4,7%
	B S4 9m 4	466,55	0%	474,1	1,6%	477,1	2,3%	486	4,2%	489,37	4,9%
	(2) B S4 12m 7	352,53	0%	359,2	1,9%	361,89	2,7%	370,6	5,1%	372,08	9,8%
	(3) B S4 9m 3	473,58	0%	482,92	2,0%	483,85	2,2%	496,06	4,7%	*	*
	(2) B S4 10,5m 5	447,99	0%	454,43	1,4%	457,5	2,1%	467,21	4,3%	470,49	5,0%
	B S4 12m 6	450,57	0%	455,96	1,2%	458,53	1,8%	469,78	4,3%	473,35	5,1%
	B S4 9m 3	794,8	0%	805,82	1,4%	811,35	2,1%	825,82	3,9%	830,58	4,5%
	(2) B S4 9m 3	385,49	0%	392,15	1,7%	394,87	2,4%	404,36	4,9%	407,5	5,7%
	(3) B S4 10,5m 5	267,34	0%	271,16	1,4%	273,1	2,2%	278,86	4,3%	279,27	4,5%
	(2) B S4 12m 6	501,75	0%	511,04	1,9%	515,17	2,7%	526,12	4,9%	527,9	5,2%
	(2) B S6 9m 15	613,02	0%	624,38	1,9%	629,3	2,7%	647,22	5,6%	652,06	6,4%
	(2) B S6 13.5m 20	469,13	0%	475,17	1,3%	478,36	2,0%	488,34	4,1%	491,11	4,7%
	B S4 7.5m 2	524,49	0%	534,8	2,0%	540,03	3,0%	554,45	5,7%	558,39	6,5%
	B S5 13.5m 13	637,17	0%	643,42	1,0%	646,49	1,5%	657,9	3,3%	662,8	4,0%
	B S6 12m 17	674,77	0%	680,55	0,9%	683,79	1,3%	693,13	2,7%	697,41	3,4%
	(2) B S5 12m 10	537,99	0%	550,41	2,3%	555,62	3,3%	570,49	6,0%	572	6,3%
	B S5 12m 11	438,28	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	B S4 7.5m 1	329,41	0%	337,72	2,5%	344,53	4,6%	356,24	8,1%	*	*
	(2) B S5 13.5m 13	1008,7	0%	1016,71	0,8%	1025,47	1,7%	1035,96	2,7%	1042,99	3,4%
B S5 12m 10	864,12	0%	883,6	2,3%	891,73	3,2%	914,51	5,8%	*	*	
B S6 9m 15	667,88	0%	675,3	1,1%	679,41	1,7%	693,46	3,8%	698,88	4,6%	
B S6 13.5m 20	561,65	0%	567,04	1,0%	569,99	1,5%	578,9	3,1%	581,58	3,5%	
Média	<b>513,12</b>			<b>1,5%</b>		<b>2,2%</b>		<b>4,3%</b>		<b>4,9%</b>	
Calcário amarelo	S5 9m 12	414,75	0%	420,95	1,5%	423,79	2,2%	431,97	4,2%	434,14	4,7%
	S5 3m 10	389,04	0%	392,52	0,9%	394,51	1,4%	400,48	2,9%	402	3,3%
	(2) S6 0m 13	338,38	0%	344,74	1,9%	347,91	2,8%	356,88	5,5%	357,49	5,6%
	S4 3m 2	395,43	0%	400,07	1,2%	403,04	1,9%	410,94	3,9%	412,99	4,4%
	S5 3m 8	424,06	0%	433,54	2,2%	439,28	3,6%	455,48	7,4%	456,25	7,6%
	S4 6m 5	539,08	0%	550,29	2,1%	559,73	3,8%	570,25	5,8%	571,27	6,0%
	S6 6m 15	330,78	0%	335,4	1,4%	337,5	2,0%	347,94	5,2%	348,63	5,4%

S6 4.5m 14	496,36	*	*	*	*	*	*	*	*	*
(2) S5 6m 11	351,98	0%	358,76	1,9%	361,88	2,8%	368,94	4,8%	369,33	4,9%
S4 6m 6	514,28	0%	526,66	2,4%	533,9	3,8%	545,97	6,2%	546,5	6,3%
S5 6m 11	467,88	0%	472,68	1,0%	474,83	1,5%	481,89	3,0%	483,63	3,4%
S5 3m 9	667,91	0%	676,51	1,3%	680,77	1,9%	691,46	3,5%	696,14	4,2%
S4 3m 3	436,75	0%	441	1,0%	443,2	1,5%	450,57	3,2%	452,73	3,7%
S4 6m 7	391,5	0%	400,31	2,3%	406,15	3,7%	417,7	6,7%	415,57	6,1%
S6 0m 13	439,66	0%	446,13	1,5%	449,55	2,2%	460,4	4,7%	462,51	5,2%
Média	426,90			1,5%		2,2%		4,8%		5,1%

\* amostra destruída ou danificada

## Anexo VI – Resultado do ensaio do Martelo de Schmidt

		Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Calcário cinzento	B S4 12m 7	13	Amostra partiu-se no ensaio										
	B S4 10.5m 5	Amostra demasiado pequena											
	B S4 9m 4	13	15	13	13	16	17	18	18	15	17	17	
	(2) B S4 12m 7	Amostra demasiado pequena											
	(3) B S4 9m 3	19	21	19	19	21	20	20	20	21	19	21	
	(2) B S4 10,5m 5	14	12	12	Amostra partiu-se no ensaio								
	B S4 12m 6	13	14	20	18	17	18	17	18	19	19	19	
	B S4 9m 3	22	16	22	22	22	Amostra partiu-se no ensaio						
	(2) B S4 9m 3	Amostra demasiado pequena											
	(3) B S4 10,5m 5	Amostra demasiado pequena											
	(2) B S4 12m 6	Amostra demasiado pequena											
	(2) B S6 9m 15	20	16	15	Amostra partiu-se no ensaio								
	(2) B S6 13.5m 20	Amostra demasiado pequena											
	B S4 7.5m 2	17	15	15	16	16	16	16	16	16	16	14	16
	B S5 13.5m 13	22	22	19	21	19	18	18	18	20	17	21	
	B S6 12m 17	23	22	23	21	21	22	21	24	22	21	23	
	(2) B S5 12m 10	Amostra demasiado pequena											
	B S5 12m 11	14	15	18	15	Amostra partiu-se no ensaio							
	B S4 7.5m 1	Amostra demasiado pequena											
	(2) B S5 13.5m 13	21	20	20	22	18	19	15	Amostra partiu-se no ensaio				
B S5 12m 10	17	19	16	22	20	20	21	20	21	20	21		
B S6 9m 15	18	18	19	20	17	16	14	Amostra partiu-se no ensaio					
B S6 13.5m 20	18	18	19	20	20	18	18	18	18	18	19		
Média												20	
Calcário amarelo	S5 9m 12	Amostra demasiado pequena											
	S5 3m 10	Amostra demasiado pequena											
	(2) S6 0m 13	16	17	16	14	16	20	18	19	Amostra partiu-se no ensaio		18,5	
	S4 3m 2	15	18	19	17	18	19	17	16	15	15	18	
	S5 3m 8	15	15	17	15	16	16	16	15	16	15	16	

S4 6m 5	16	Amostra partiu-se no ensaio									
S6 6m 15	10	Amostra partiu-se no ensaio									
S6 4.5m 14		Amostra demasiado pequena									
(2) S5 6m 11		Amostra demasiado pequena									
S4 6m 6		Amostra demasiado pequena									
S5 6m 11	21	19	21	19	22	20	21	18	18	22	21
S5 3m 9	17	14	14	12	13	16	14	14	16	15	15,5
S4 3m 3	18	20	18	16	20	18	16	Amostra partiu-se no ensaio			
S4 6m 7		Amostra demasiado pequena									
S6 0m 13	19	16	16	16	15	18	19	22	19	16	19
Média											18,25

### Anexo VII – Ensaio do Slake Durability Test (teste 1)

	Amostra	Peso (g)	Peso seco	1º ciclo (g)		2º ciclo (g)		3º ciclo (g)	
Calcário cinzento	1 B S4 12m 6; 2 (2) B S4 12m 6	506	495,42	489,5	98,81%	486,9	98,28%	484,48	95,75%
	3 B S5 13.5m 13; 4 (2) B S5 13.5m 13	500	489,08	483,24	98,81%	480,71	98,29%	478,15	95,63%
	5 B S4 9m 3; 6 (2) B S4 9m 3; 7 (3) B S4 9m 3	490	478,68	472,53	98,72%	469,91	98,17%	467,57	95,42%
	8 B S4 10,5m 5; 9 (2) B S4 10,5m 5; 10 (3) B S4 10,5m 5	508	498,8	494,81	99,20%	492,26	98,69%	489,7	96,40%
	11 B S4 12m 7; 12 (2) B S4 12m 7	514	502,62	498,34	99,15%	495,55	98,59%	492,76	95,87%
	13 B S6 9m 15; 14 (2) B S6 9m 15	518	510,06	503,91	98,79%	500,77	98,18%	497,61	96,06%
	15 B S6 13.5m 20; 16 (2) B S6 13.5m 20	484	492,37	488,35	99,18%	486,6	98,83%	484,73	100,15%
	17 B S5 12m 10; 18 (2) B S5 12m 10	456	452,57	447,27	98,83%	444,19	98,15%	441,24	96,76%
Calcário amarelo	19 S6 0m 13; 20 (2) S6 0m 13	498	487,83	481,8	98,76%	479,27	98,25%	476,7	95,72%
	21 S5 6m 11; 22 (2) S5 6m 11	522	520,83	514,88	98,86%	510,45	98,01%	508,29	97,37%
	23 S6 4.5m 14; 24 S4 6m 7; 25 S6 6m 15	544	529,38	520,65	98,35%	514,02	97,10%	507,32	93,26%
	26 S4 3m 3; 27 S4 3m 2	546	535,84	530,86	99,07%	528,59	98,65%	525,22	96,19%
	Média				98,83%		98,25%		95,87%

**Anexo VIII - Ensaio do Slake Durability Test (teste 2)**

		Peso (g)	Peso seco	1º ciclo (g)		2º ciclo (g)		3º ciclo (g)	
Calcário cinzento	1 B S5 13.5m 1; 2 B S5 9m 2	540	529,85	524,65	99,02%	522,56	98,62%	520,8	98,29%
	3 B S6 12m 3; 4 B S6 7.5m 4	486	466,55	459,22	98,43%	456,06	97,75%	453,5	97,20%
	5 B S4 10.5m 5; 6 B S4 12m 6	506	492,76	487,99	99,03%	484,14	98,25%	482,14	97,84%
Calcário amarelo	7 S4 4.5m 1; 8 S4 3.5m 2	464	453,43	447,26	98,64%	444,45	98,02%	441,01	97,26%
	9 S6 0m 3; 10 S5 3.5m 4	524	511,53	507,28	99,17%	505,12	98,75%	502,66	98,27%
	11 S5 6m 5; 12 S5 6m 6	482	462,26	444,92	96,25%	431,12	93,26%	418,35	90,50%
<b>Média</b>					<b>98,83%</b>		<b>98,14%</b>		<b>97,55%</b>