



**UNIVERSIDADE DE COIMBRA**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**Departamento de Ciências da Terra**

**Caraterização Geotécnica dos Xistos Negros  
de dois Taludes da EN17**

João Miguel Oliveira Rebelo Alves

**MESTRADO EM ENGENHARIA GEOLÓGICA E DE MINAS**

**Setembro, 2014**

**UNIVERSIDADE DE COIMBRA**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**Departamento de Ciências da Terra**



# **Caraterização Geotécnica dos Xistos Negros de dois Taludes da EN17**

**João Miguel Oliveira Rebelo Alves**

**Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica e Minas**

## **Orientadores científicos**

Prof. Doutor Mário de Oliveira Quinta Ferreira, Faculdade Ciências e Tecnologia da  
Universidade de Coimbra

Prof. Doutor Pedro Gomes Cabral Santarém Andrade, Faculdade Ciências e Tecnologia da  
Universidade de Coimbra

**Setembro, 2014**





# AGRADECIMENTOS

Quero expressar o meu sincero agradecimento a algumas pessoas, cuja contribuição foi fundamental para a realização deste trabalho.

Aos Professores Doutor Mário de Oliveira Quinta Ferreira e Professor Doutor Pedro Gomes Cabral Santarém Andrade um agradecimento pela orientação, pela disponibilidade permanente e pelas sugestões dadas ao longo deste trabalho e dos anos de curso.

Ao Laboratório de Geotécnia do Instituto Pedro Nunes (IPNLabGeo) pela disponibilização das instalações, e aos seus colaboradores João Pedro e João Carvalho pelo auxílio prestado.

Ao Sr. Carlos Maia, funcionário do laboratório de difração de raios X, pela disponibilidade e ajuda prestada.

Um agradecimento sincero e especial aos meus amigos, pela amizade, companheirismo e apoio ao longo dos anos. São os melhores.

Uma palavra à minha família, por todo o carinho, paciência e compreensão, em especial à minha mãe e irmão, por serem simplesmente fantásticos.

A todas as pessoas que não referi, mas que fizeram parte da minha vida nestes anos, um muito obrigado.



# RESUMO

Este trabalho teve como principal objetivo determinar e comparar a qualidade do material e do maciço rochoso de dois taludes (Talude 1 e Talude 2) de idade précâmbrica, no concelho de Coimbra, efetuando um estudo geológico e a caracterização geotécnica dos xistos existentes nesses taludes.

A investigação desenvolvida foi centrada em duas componentes: material rochoso e os solos de alteração. Foram elaboradas duas dissertações em simultâneo, sendo a presente centrada na caracterização do material rochoso.

Primeiro foi efetuado um reconhecimento geológico das zonas em questão e efetuou-se uma classificação visual, utilizando a classificação Basic Geotechnical Description (ISRM, 1981). Em segundo, fez-se um levantamento geotécnico, dos taludes, tendo em atenção a classificação Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989) e recorreu-se à definição do Índice Geological Strength Index (GSI) desenvolvido por Hoek et al. (1992) e Hoek (1994).

Foi também efetuada, a determinação “in situ” da dureza através do esclerómetro de Schmidt. Este ensaio apenas foi possível efetuar no Talude 1, devido à má qualidade do Talude 2.

De modo a avaliar e a confirmar os resultados das classificações efetuadas “in situ”, procedeu-se à recolha de amostras, que foram posteriormente submetidas em laboratório, a ensaios de caracterização física, tais como a determinação do teor em água, a porosidade e os pesos volúmicos; ensaios de definição da resistência, como o Point Load Test e de desgaste de Los Angeles; ensaios de durabilidade, como a absorção em água e Slake durability. Foi ainda efetuada a identificação dos minerais de uma fracção de rocha através dos Raios X.

Com os valores dos parâmetros obtidos procedeu-se ao tratamento dos dados. Definiram-se gráficos das possíveis relações, e estabeleceram-se comparações entre parâmetros ou índices utilizados, que por vezes, foram estimados por métodos diferentes.

Com base nesses resultados, obtiveram-se Índices RMR e GSI maiores para o maciço rochoso do Talude 1, tendo sido classificado como razoável, enquanto o Talude 2 foi classificado como mau.

**Palavras-chave:** estudo geotécnico, série negra, classificações geomecânicas, ensaios laboratoriais







# ABSTRACT

*The main propose of the present work was to study and compare the rock material quality from two slopes in Coimbra, dated from Precambrian. A geological survey and geotechnical characterization of these slopes materials was performed.*

*The research developed was focused on two components: rock material and alteration soils. Two dissertations were prepared simultaneously. The present one is focused on the characterization of the rock material.*

*A geological reconnaissance of the areas was done and a visual classification using the Basic Geotechnical Description (ISRM, 1981) was performed. The Rock Mass Rating (RMR) of Bieniawski (1989) was used and complemented by the Geological Strength Index (GSI) developed by Hoek et al. (1992) and Hoek (1994).*

*The "in situ" determination of the hardness using the Schmidt hammer was done. This test was only possible to do on Slope 1 due to poor quality of Slope 2.*

*In order to complement the results of the classifications made "in situ", samples were collect and tested in laboratory. Physical testes such as water content, porosity and density; strength and abrasion tests, Point Load and Los Angeles; durability tests such as water submersion, and Slake durability. The identification of the rock minerals using X-Ray.*

*The results obtained allowed to prepare graphs and to evaluate possible relationships, and comparisons between parameters, sometimes by different methods.*

*Based on the results, higher GSI and RMR indices for Slope 1 was obtained. Slope 1 was classified as reasonable, while Slope 2 was classified as poor.*

**Key-Words:** *geotechnical study, schist, geomechanical classifications, laboratory tests.*



# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO .....	III
ABSTRACT .....	V
ÍNDICE.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
ÍNDICE DE TABELAS .....	XIII
GLOSSÁRIO .....	XV
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - Metodologias e objetivos.....	1
CAPÍTULO 2. CLASSIFICAÇÕES DE MACIÇOS ROCHOSOS .....	3
2.1 - Basic Geotechnical Description (BGD).....	3
2.1.1- Caracterização Geológica .....	4
2.1.1.1- Grau de alteração dos maciços rochosos.....	4
2.1.2 - Características Estruturais do Maciço Rochoso .....	5
2.1.2.1- Grau de fracturação dos maciços rochosos .....	5
2.1.2.2 - Espessura das camadas .....	5
2.1.3 - Características Mecânicas .....	6
2.1.3.1- Resistência à compressão simples .....	6
2.1.3.1.1- Determinação da dureza.....	8
2.1.3.1.2- Classificação da resistência das rochas .....	9
2.1.3.1.3- Ensaio de resistência à carga pontual (Point Load Test).....	10
2.1.4 - Ângulo de atrito das fraturas .....	10
2.2 - Classificação Rock Mass Rating (RMR) .....	11
2.2.1 - Resistência uniaxial do material rochoso .....	14
2.2.2 - Rock Quality Designation (RQD).....	14
2.2.3 - Espaçamento das descontinuidades .....	16
2.2.4 – Condições das descontinuidades .....	18

2.2.4.1 – Comprimento da descontinuidade.....	19
2.2.4.2 – Abertura da descontinuidade.....	20
2.2.4.3 – Rugosidade da descontinuidade .....	21
2.2.4.4 – Enchimento da descontinuidade.....	23
2.2.4.5 – Grau de alteração da descontinuidade .....	24
2.2.5 – Presença de água.....	24
2.2.6 – Orientação das descontinuidades .....	25
2.3 – Geological Strength Index (GSI).....	27
2.4 – Norma ISO 14689-1 (2003).....	29
<b>CAPÍTULO 3. ENSAIOS LABORATORIAIS.....</b>	<b>31</b>
3.1 - Ensaios de caracterização física .....	31
3.1.1 – Teor em água.....	31
3.1.2 – Porosidade e massa volúmica .....	32
3.2 – Ensaios de resistência do maciço rochoso .....	34
3.2.1 – Ensaio de resistência à carga pontual (“Point Load Strength Test”).....	34
3.2.2 – Ensaio “Los Angeles” .....	38
3.3 – Ensaios de Durabilidade .....	40
3.3.1 – Absorção de água .....	40
3.3.2 – Ensaio de desgaste em meio húmido (“Slake durability test”) .....	41
<b>CAPÍTULO 4. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO .....</b>	<b>45</b>
4.1 – Enquadramento geográfico.....	45
4.2 - Enquadramento geológico regional.....	50
4.3 – Enquadramento geológico local.....	54
<b>CAPÍTULO 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS .....</b>	<b>59</b>
5.1 - Basic Geotechnical Description (BGD).....	59
5.1.1 - Grau de alteração dos maciços rochosos.....	59
5.1.2 - Grau de fracturação dos maciços rochosos .....	59
5.1.3 - Espessura das camadas .....	60

5.1.4 - Resistência à compressão Uniaxial.....	60
5.1.5 - Ângulo de atrito das fraturas .....	62
5.2 - Classificação Rock Mass Rating (RMR) ou de Bieniawski .....	64
5.2.1 – Resistência à compressão uniaxial .....	64
5.2.2 - Rock Quality Designation (RQD).....	64
5.2.3 - Espaçamento das descontinuidades .....	65
5.2.4 - Condições das descontinuidades .....	65
5.2.5 – Presença de água.....	66
5.3 - Geological Strenght Index (GSI).....	68
CAPÍTULO 6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	69
6.1 - Mineralogia e geoquímica.....	69
6.1.1 – Identificação dos minerais através da difração dos Raios x .....	69
6.2 - Ensaio de caracterização física .....	70
6.2.1 – Determinação do Teor em água .....	70
6.2.2 – Porosidade aberta e massa volúmica .....	71
6.3 - Ensaio de resistência do material rochoso .....	73
6.3.1 - Ensaio de resistência à carga pontual (“Point Load Test”).....	73
6.3.2 - Ensaio “Los Angeles” .....	74
6.4 - Ensaio de Durabilidade .....	74
6.4.1 – Teor em água de submersão/teor em água de saturação .....	74
6.4.2 - Ensaio de desgaste (“Slake durability”).....	76
6.5 - Análise comparativa dos resultados dos ensaios aos materiais rochosos.....	77
CAPÍTULO 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	89
ANEXOS .....	91
ANEXO I - Ábaco para estimativa da resistência à compressão a partir da dureza de Schmidt (Hoek, 2007).....	92
ANEXO II - Parâmetros das condições das descontinuidades para a Zona A do 1º talude, segundo a Classificação BGD e RMR .....	93

ANEXO III - Parâmetros das condições das discontinuidades para a Zona B do 1º talude, segundo a Classificação BGD e RMR.....	94
ANEXO IV - Parâmetros das condições das discontinuidades para o 2º talude, segundo a Classificação BGD e RMR.....	95
ANEXO V – Valores de dureza R obtidos através do esclerómetro do tipo de Schmidt e valores correlacionados da Resistência à Compressão Uniaxial.....	96
ANEXO VI – Valores da massa volúmica aparente e da porosidade para os 2 taludes.....	97

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Equipamento de esclerómetro do tipo Martelo de Schmidt .....	9
Figura 2.2 – Procedimento para a determinação do RQD através de testemunhos de sondagens (Deere, 1989).....	15
Figura 2.3 – Representação esquemática das propriedades geométricas das descontinuidades (Vallejo et al., 2002).....	16
Figura 2.4 – Medida do espaçamento numa face do afloramento (ISRM, 1981). .....	17
Figura 2.5 – Distintos modelos de continuidade de várias famílias de descontinuidades (ISRM, 1981) .....	19
Figura 2.6 - Tipos de descontinuidade em função da abertura (ISRM, 1981).....	20
Figura 2.7 – Perfis de rugosidade (ISRM, 1981) .....	22
Figura 2.8 - Representação de descontinuidades fechadas, abertas e preenchidas (ISRM, 1981).....	23
Figura 2.9 - Orientação de uma descontinuidade N60°E; 30° SE, (Lima & Menezes, 2008) .....	26
Figura 3.1 – Recipiente para a realização do ensaio de determinação da massa volúmica e da porosidade aberta .....	32
Figura 3.2 – Equipamento portátil utilizado no ensaio de resistência à carga pontual .....	34
Figura 3.3 – Especificações das dimensões dos provetes a utilizar nos ensaios de resistência à carga pontual (adaptado de ISRM, 1981) .....	35
Figura 3.4 - Provetes utilizados no ensaio de carga pontual.....	36
Figura 3.5 - Fraturas válidas e não válidas nos ensaios de carga pontual (ISRM, 1981) .....	36
Figura 3.6 – Proвете antes e depois da realização do ensaio de carga pontual .....	37
Figura 3.7 – Tambor metálico usado na realização do ensaio de Los Angeles .....	39
Figura 3.8 – Carga abrasiva utilizada no ensaio de Los Angeles.....	39
Figura 3.9 – Provetes utilizados na realização do ensaio de absorção de água.....	41
Figura 3.10 – Provetes usados na realização do ensaio de desgaste .....	42
Figura 3.11 – Tambores usados na realização do ensaio de desgaste .....	43
Figura 4.1 - Enquadramento geográfico e administrativo da área em estudo na NUTIII (CCDRC, 2014) .....	45

Figura 4.2 - Localização dos taludes na folha nº241 (Coimbra Sul) da Carta Militar de Portugal elaborada pelos Serviços Cartográficos do Exército (1984).....	46
Figura 4.3 - Representação pormenorizada do Talude 1 na folha nº241 (Coimbra Sul) da Carta Militar de Portugal elaborada pelos Serviços Cartográficos do Exército (1984) .....	47
Figura 4.4 - Representação pormenorizada do Talude 2 na folha nº241 (Coimbra Sul) da Carta Militar de Portugal elaborada pelos Serviços Cartográficos do Exército (1984) .....	47
Figura 4.5 – Vista geral dos dois taludes ( <i>Google earth</i> , 2014).....	48
Figura. 4.6 - Localização do Talude 1 ( <i>Google earth</i> , 2014) .....	48
Figura. 4.7 - Localização do Talude 2 ( <i>Google earth</i> , 2014) .....	49
Figura 4.8 - Localização dos 2 taludes em extrato da Carta Geológica de Portugal, folha 19-D. Coimbra-Lousã, elaborada por Soares et al. (2007).....	50
Figura 4.9 – Talude 1, zona A, localizado à saída da A13 .....	54
Figura 4.10 – Talude 1, zona B, localizado à saída da A13. ....	55
Figura 4.11 – Famílias de descontinuidade do Talude 1, zona A (Rockscience, 2004) .....	56
Figura 4.12 – Famílias de descontinuidade do Talude 1, zona B (Rockscience, 2004).....	56
Figura 4.13 – Talude 2, localizado na EN 17 frente à povoação do Cabouco.....	57
Figura 4.14 – Famílias de descontinuidade do Talude 2 (Rockscience, 2004) .....	58
Figura 6.1 – Resultado do ensaio de difração dos Raios X para o material rochoso do Talude 1.....	69
Figura 6.2 – Resultado do ensaio de difração dos Raios X para o material rochoso do Talude 2.....	70
Figura 6.3 – Variação do teor em água de submersão ao longo do tempo .....	75
Figura 6.4 – Percentagem de desgaste para os xistos dos 2 taludes .....	77
Figura 6.5 – Relação entre a porosidade e o peso volúmico.....	78
Figura 6.6 – Relação entre os resultados do teor em água de saturação e da porosidade .....	78
Figura 6.7 – Relação entre os resultados do teor em água de saturação e o peso volúmico.....	79
Figura 6.8 – Relação entre teor em água de submersão e teor em água de saturação por vácuo .....	80
Figura 6.9 – Relação entre o peso volúmico aparente e o índice de durabilidade em meio húmido ..	80
Figura 6.10 – Relação entre a porosidade e o índice de durabilidade em meio húmido (2º ciclo) .....	81
Figura 6.11 – Relação entre o peso volúmico aparente e o $I_{s(50)}$ .....	82
Figura 6.12 – Relação entre o $I_{s(50)}$ e o teor em água .....	83

# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Diferentes estados de alteração de maciços rochosos (adaptado da ISRM, 1981).....	4
Tabela 2.2 – Classificação do espaçamento da fracturação de maciços rochosos (adaptado da ISRM, 1981).....	5
Tabela 2.3 – Classificação da espessura de camadas de maciços rochosos (adaptado da ISRM, 1981).	6
Tabela 2.4 - Diferentes classificações da resistência à compressão uniaxial do material rochoso (Ramamurthy, 2010) .....	7
Tabela 2.5 - Classificação com base nos módulos de deformação (Ramamurthy, 2010) .....	7
Tabela 2.6 – Classificação das diferentes resistências à compressão uniaxial (adaptado da ISRM, 1981) .....	8
Tabela 2.7 – Graus da resistência à compressão simples (ISRM, 1981).....	10
Tabela 2.8 – Designação do ângulo de atrito (ISRM, 1981) .....	10
Tabela 2.9 - Classificação geomecânica RMR de Bieniawski (1989) .....	12
Tabela 2.10 - Efeito da orientação das descontinuidades (Bieniawski, 1989) .....	13
Tabela 2.11 - Classificação do maciço rochoso através da classificação RMR de Bieniawski (1989)....	13
Tabela 2.12 – Resistência do material rochoso na classificação RMR (Bieniawski, 1989) .....	14
Tabela 2.13 – Sistema de classificação da qualidade do maciço rochoso em função do índice RQD, adaptado de Deere et al. (1967) .....	15
Tabela 2.14 – Classificação do espaçamento das descontinuidades (ISRM, 1981) .....	18
Tabela 2.15 - Classificação da continuidade (ISRM, 1981).....	20
Tabela 2.16 – Classificação da abertura (ISRM, 1981) .....	21
Tabela 2.17 – Classificação da rugosidade das superfícies das descontinuidades (ISRM, 1981).....	23
Tabela 2.18 – Diferentes tipos de material de preenchimento (Bieniawski, 1989).....	24
Tabela 2.19 – Classificação segundo a presença de água nas descontinuidades (ISRM, 1981).....	25
Tabela 2.20 - Estimativa do índice GSI (Hoek & Marinos, 2000).....	28
Tabela 3.1 – Classificação dos valores da massa volúmica aparente de acordo com a IAEG (1979)....	33
Tabela 3.2 – Classificação dos valores da porosidade de acordo com a IAEG (1979).....	34
Tabela 3.3 – Classificação do coeficiente Los Angeles para agregados (FprEn 13242, (2011)) .....	40

Tabela 3.4 – Classificação de Aufmuth (1974) .....	43
Tabela 3.5 – Classificação de Gamble (1971) .....	44
Tabela 5.1 - Classificação do grau de fracturação dos maciços dos 2 taludes .....	60
Tabela 5.2 – Valores médios da dureza de Schmidt (R) e da Resistência à compressão uniaxial das zonas A e B do Talude 1, calculada com os resultados do esclerómetro do tipo de Schmidt .....	61
Tabela 5.3 – Classificação da classe do ângulo de atrito dos 2 taludes .....	62
Tabela 5.4 – Caraterização dos maciços rochosos dos 2 Taludes de acordo com os resultados da classificação BGD.....	63
Tabela 5.5 - Cálculo do $J_v$ e estimativa do RQD para os 2 taludes.....	65
Tabela 5.6 – Pesos atribuídos segundo a Classificação RMR (1989), para as condições das descontinuidades. ....	66
Tabela 5.7 – Valores ponderais do RMR (1989) dos maciços rochosos dos 2 Taludes .....	67
Tabela 5.8 – Valores calculados de RMR e de GSI.....	68
Tabela 6.1 – Valor médio do teor em água obtido para os 2 taludes .....	71
Tabela 6.2 – Intervalo de valores da massa volúmica aparente e da porosidade aberta para os xistos dos 2 taludes .....	71
Tabela 6.3 – Novo cálculo da massa volúmica aparente e da porosidade aberta para os xistos do Talude 1 .....	72
Tabela 6.4 – Valores médios do $I_{s(50)}$ desvio padrão e resistência à compressão uniaxial obtidos na realização do ensaio .....	73
Tabela 6.5 – Resultado do desgaste de LA, para os 2 taludes.....	74
Tabela 6.6 – Valores de absorção dos 2 taludes .....	75
Tabela 6.7 – Valores de saturação dos 2 taludes .....	76

# GLOSSÁRIO

A – área seccional dos provetes

A13 – Autoestrada 13

b – massa volúmica aparente

BGD – Basic Geotechnical Description

CCDRC – comissão de coordenação e desenvolvimento regional do centro

CEN – Comité Europeu de Normalização

D – distância entre ponteiras cónicas que exercem a força sobre o provete

De – diâmetro equivalente

EN17 – Estrada Nacional 17

F – fator de correção da dimensão

GSI – Geological Strength Index

IAEG - International Association of Engineering Geology

Is – índice de resistência à carga pontual não corrigida

Is<sub>(50)</sub> - índice de resistência à carga pontual corrigida para um diâmetro de 50mm

ISO - International Organization for Standardization

ISRM – International Society for Rock Mechanics

Jv – número de descontinuidades por unidade de volume

kN - kiloNewton

KPa – Kilopascal

LA – coeficiente de Los Angeles

m – massa retida no peneiro de 1,6mm

m<sub>d</sub> – massa seca do provete

m<sub>h</sub> – massa do provete submerso

MPa – Megapascal

m<sub>s</sub> – massa do provete saturado

Nm – Newton metro

NP – Norma Portuguesa

NUT - Nomenclatura das Unidades Territoriais

P – carga pontual requerida para levar à rotura o material rochoso

$P_0$  – porosidade aberta

Q – Índice de Barton

R – dureza de Schmidt

$R^2$  – coeficiente de determinação

$r_h$  – densidade da água

RMR – Rock Mass Rating

RQD – Rock Quality Designation

S – espaçamento médio das fraturas

W – largura da seção transversal do provete na qual atuam as cargas

$\beta$  – azimute da linha de maior declive

$\Phi$  – pendora da linha de maior declive

# CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 - Metodologias e objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo efetuar a caraterização do material rochoso de dois taludes pertencentes à Série Negra cuja idade é précâmbrica. Procedeu-se à realização de um estudo geológico e geotécnico dos referidos taludes.

A investigação do material litológico, presente nos taludes, pode centrar-se em duas componentes principais: material rochoso e solos de alteração. Foram preparadas duas dissertações, sendo a presente centrada no material rochoso dos taludes, enquanto a componente relativa ao estudo dos solos foi elaborada por Perdigão (2014).

Os parâmetros para a estimativa das classificações BGD e RMR, foram recolhidos em simultâneo, pelo autor deste trabalho e Perdigão (2014), e aplicados nas diferentes áreas de estudo.

O material rochoso estudado corresponde a xistos negros com intercalações de quartzo, da sequência metasedimentar do tipo Série Negra, que aflora numa área considerável do concelho de Coimbra, designadamente na sua parte Leste.

O material estudado apresenta, por vezes, um comportamento problemático, principalmente nos períodos de maior precipitação. Exemplo disso, foram as situações de instabilidade num talude adjacente a um dos pilares do viaduto da A13, sobre o rio Ceira e a Estrada da Beira (N17), nas imediações de Coimbra, após chuvas intensas.

Segundo Yagiz & Cheema (1998-2000), os sistemas de classificação dos maciços rochosos servem para quantificar os parâmetros mais importantes que influenciam o comportamento geomecânico dos maciços, pelo que seguindo este pensamento foram efetuadas caracterizações de ambos os taludes utilizando a classificação *Basic Geotechnical Description* (BGD) e posteriormente, uma classificação dos mesmos com base na classificação *Rock Mass Rating* (RMR) e no *Geological Strength Index* (GSI).

Com o material recolhido nos taludes, efetuaram-se ensaios laboratoriais, entre os quais se destacam os ensaios de determinação de resistência, como o *Point Load Test*, e os ensaios de abrasão Los Angeles e de *Slake Durability*, utilizados para determinar a resistência ao desgaste dos materiais estudados.



## **CAPÍTULO 2. CLASSIFICAÇÕES DE MACIÇOS ROCHOSOS**

A descrição e a caracterização de maciços rochosos em afloramentos é uma ferramenta essencial em todos os estudos de engenharia geológica, em que o principal objetivo seja o conhecimento das propriedades e características geotécnicas dos materiais rochosos (Vallejo et al., 2002).

A qualidade e a resistência dos maciços rochosos são definidas pelas classificações geomecânicas. Os valores dos parâmetros constituintes das classificações são determinados através da observação direta e por ensaios de caracterização, in situ e em laboratório.

No sentido de realizar uma caracterização geotécnica, foram utilizadas as classificações Basic Geotechnical Description (BGD) da ISRM (1981) e Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1979, 1989), recorrendo-se também à definição do Geological Strength Index (índice GSI) desenvolvido por Hoek et al. (1992) e Hoek (1994).

### **2.1 - Basic Geotechnical Description (BGD)**

A classificação Basic Geotechnical Description (BGD) foi estabelecida para caracterizar os maciços rochosos, através de levantamentos de campo que incluem observações geológicas e medição de alguns parâmetros. É uma classificação proposta pela ISRM (1981), foi estabelecida de modo a permitir uma normalização dos termos adotados no estudo dos maciços rochosos e que fosse compreensível para geotécnicos provenientes de diferentes formações, apresenta no entanto alguma dificuldade e mesmo subjetividade na determinação de alguns parâmetros.

A classificação BGD apresenta os seguintes parâmetros de caracterização geológica e também relacionados com aspetos estruturais dos maciços rochosos: a espessura das camadas e o espaçamento entre fraturas; características mecânicas como a resistência à compressão simples do material rochoso e o ângulo de atrito das superfícies das discontinuidades; devendo ainda definir-se o estado de alteração do material rochoso. Esta classificação visa permitir a extrapolação de informação fundamental para uma avaliação geotécnica correta, mas também é essencial para interpretar e complementar os resultados dos ensaios laboratoriais. Fatores como o estado de alteração do material, o

estado de fracturação, a presença ou ausência de material de enchimento das diaclases e sua qualidade, fazem variar drasticamente as características do maciço. A classificação BGD antes de ser aplicada pressupõe a definição prévia do zonamento do maciço.

## 2.1.1- Caracterização Geológica

O parâmetro da caracterização geológica está diretamente relacionado com a qualidade do maciço, que depende essencialmente do grau de alteração e de fracturação. Outros fatores, como a percolação da água, têm também um papel importante e que influenciam essa qualidade. A caracterização geológica é geralmente efetuada tendo por base métodos de observação expeditos. É essencial no estudo das rochas pois vai ajudar a definir o tipo de material rochoso em estudo. Muller (1962) e Lida (1970) criaram classificações baseadas no estado de alteração e fracturação, que serviram de base às classificações hoje existentes.

### 2.1.1.1- Grau de alteração dos maciços rochosos

Para definir o grau de alteração rochoso, considerou-se a classificação proposta pela ISRM (1981), a qual apresenta cinco classes distintas para o estado de alteração, conforme se verifica na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Diferentes estados de alteração de maciços rochosos (adaptado da ISRM, 1981)

Símbolos	Designação	Características
<b>W1</b>	São	Sem quaisquer sinais de alteração
<b>W2</b>	Pouco alterado	Sinais de alteração apenas nas superfícies das descontinuidades
<b>W3</b>	Medianamente alterado	Alteração visível em todo o maciço rochoso mas a maior parte do material rochoso não é friável
<b>W4</b>	Muito alterado	Alteração visível em todo o maciço e a maior parte do material rochoso é friável
<b>W5</b>	Decomposto (saibro)	O maciço é completamente friável e com comportamento de solo

## 2.1.2 - Características Estruturais do Maciço Rochoso

Este parâmetro é definido tendo em atenção o espaçamento das fraturas e a espessura das camadas, cada um dos parâmetros é dividido em 5 classes.

### 2.1.2.1- Grau de fracturação dos maciços rochosos

Para definir o estado de fracturação rochoso, considerou-se a classificação proposta pela ISRM (1981), a qual apresenta cinco classes distintas de espaçamento, correspondendo cada uma das designações a: muito próximas, próximas, medianamente afastadas, afastadas e muito afastadas, conforme se verifica na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Classificação do espaçamento da fracturação de maciços rochosos (adaptado da ISRM, 1981)

Símbolos	Intervalo entre fraturas (cm)	Designação
F1	> 200	Muito afastadas
F2	60 - 200	Afastadas
F3	20 - 60	Medianamente afastadas
F4	6 - 20	Próximas
F5	< 6	Muito próximas

### 2.1.2.2 - Espessura das camadas

Este parâmetro, tal como o espaçamento de fraturas, diz respeito às características estruturais do maciço, sendo por esse motivo proposto pelo ISRM (1981) que os dois parâmetros apresentassem valores idênticos para os limites das classes.

As designações das classes dos espaçamentos das fraturas (F1 a F5) e das espessuras das camadas (L1 a L5) são, respetivamente, apresentadas nas Tabelas 2.2 e 2.3.

Tabela 2.3 – Classificação da espessura de camadas de maciços rochosos (adaptado da ISRM, 1981)

Símbolos	Espessura da camada (cm)	Designação
L1	> 200	Muito espessas
L2	60 - 200	Espessas
L3	20 - 60	Espessura mediana
L4	6 - 20	Delgadas
L5	< 6	Muito delgadas

### 2.1.3 - Características Mecânicas

As características mecânicas dos maciços são consideradas em dois parâmetros: a resistência à compressão simples e o ângulo de atrito das fraturas. Pretendendo-se estudar as propriedades e o comportamento dos maciços rochosos submetidos a tensões ou variações das suas condições iniciais.

#### 2.1.3.1- Resistência à compressão simples

Foram feitas algumas tentativas de classificações das rochas, com base na resistência à compressão uniaxial (Tabela 2.4) por autores como Coates (1964), Hanasagi (1965), Deere & Miller (1966), Stapledon (1968), Franklin et al. (1971), Bieniawski (1978) e ISRM (1978, 1980), bem como classificações com base nos módulos de deformação (Ramamurthy, 2010). A Tabela 2.5 apresenta a classificação tendo em atenção os valores dos módulos de deformação.

Tabela 2.4 - Diferentes classificações da resistência à compressão uniaxial do material rochoso (Ramamurthy, 2010)

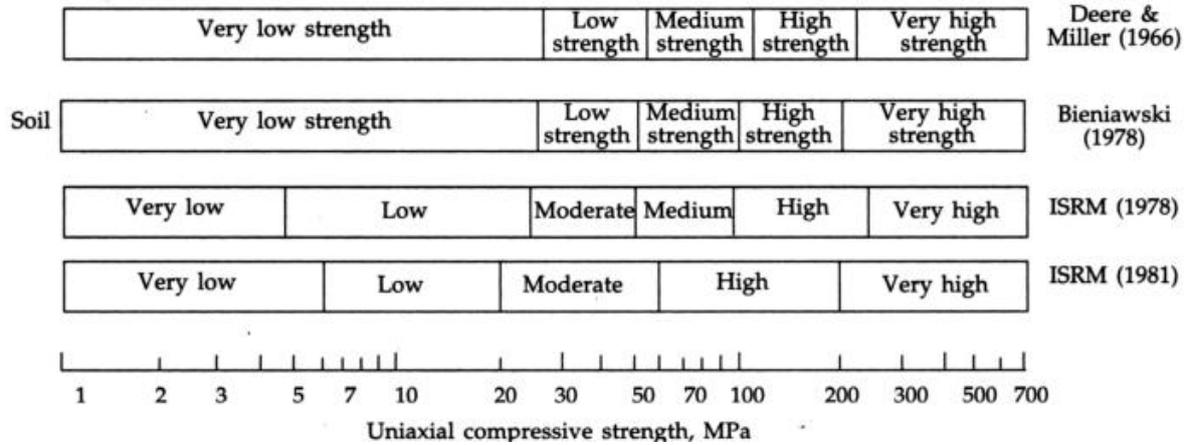


Tabela 2.5 - Classificação com base nos módulos de deformação (Ramamurthy, 2010)

Classificação	Módulos de deformação (MPa x 10 <sup>3</sup> )	Descrição da deformabilidade
1	< 5	Muito elevada
2	5 - 15	Elevada
3	15 - 30	Moderada
4	30 - 60	Baixa
5	> 60	Muito baixa

Para definir a resistência à compressão uniaxial, considerou-se a classificação proposta pela ISRM (1981), conforme se pode verificar na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Classificação das diferentes resistências à compressão uniaxial (adaptado da ISRM, 1981)

<b>Símbolos</b>	<b>Resistência à compressão uniaxial</b>	<b>Designação</b>
<b>S1</b>	> 200	Muito elevada
<b>S2</b>	60 -200	Elevada
<b>S3</b>	20 - 60	Média
<b>S4</b>	6- 20	Baixa
<b>S5</b>	< 6	Muito baixa

### 2.1.3.1.1- Determinação da dureza

O esclerómetro do tipo de Schmidt (martelo de Schmidt) corresponde a um equipamento portátil e que é utilizado para determinar a dureza do material rochoso (R), bem como para estimar a resistência à compressão uniaxial (Figura 2.1). Os ensaios com o esclerómetro do tipo de Schmidt são de execução simples e rápida.

O aparelho apresenta uma forma cilíndrica, sendo que no seu interior existe uma mola e uma haste de aço móvel, sendo que a primeira é acionada quando se exerce pressão da haste contra o material ou superfície que se pretende testar. O esclerómetro do tipo de Schmidt utilizado no presente trabalho foi do tipo L, apresentando uma energia de impacto de 0,73 Nm.

Utilizaram-se as recomendações ISRM (1978) que preconizam que para cada local de ensaio devem ser efetuadas 20 determinações, sendo os 10 valores mais baixos rejeitados e considerando-se os 10 valores mais elevados.

A partir do valor da dureza de Schmidt pode definir-se a resistência à compressão uniaxial através do ábaco, presente no ANEXO I.

Neste trabalho procedeu-se à devida calibração do esclerómetro do tipo de Schmidt, procedendo-se, em termos médios a 10 leituras num batente de aço cuja finalidade é a verificação da referida calibração.

A superfície das amostras ou dos afloramentos, para a realização dos ensaios, deve ser o mais possível livre de rugosidades. Esta área e o material rochoso até a uma profundidade de 6 cm devem apresentar-se com o menor grau de alteração possível.

O valor obtido de R vai ser afetado pela orientação do martelo, podendo esta ser vertical no sentido descendente ou ascendente, horizontal ou efetuar um ângulo de 45° com a

horizontal, pelo que é recomendado que a respetiva orientação seja registada. Devem rejeitar-se os testes que originem roturas ou fissuras no material testado.

Os ensaios com o esclerómetro do tipo de Schmidt realizam-se nas superfícies dos afloramentos rochosos, podendo não representar o material rochoso na sua totalidade. As superfícies de descontinuidade do material rochoso, quando próximas da superfície testada, podem influenciar, de modo determinante, os valores obtidos “*in situ*”, nomeadamente na determinação da resistência “*in situ*” através da utilização do esclerómetro do tipo de Schmidt (Hack, 1998).

As determinações R foram efetuadas em 6 estações por afloramento, de modo a procurar definir os diferentes estados de alteração do material rochoso. Posteriormente para determinar a resistência à compressão simples foi utilizado um ábaco em que se considera a inclinação do aparelho, os valores da massa volúmica e de R (Deere e Miller, 1966).



Figura 2.1 - Equipamento de esclerómetro do tipo Martelo de Schmidt

#### 2.1.3.1.2- Classificação da resistência das rochas

Pode-se efetuar uma estimativa, não muito precisa, da resistência à compressão simples através da utilização do martelo de geólogo. Recorre-se para isso à classificação proposta pela ISRM (1981) (Tabela 2.7).

Tabela 2.7 – Graus da resistência à compressão simples (ISRM, 1981)

GRAU	DESIGNAÇÃO	$\sigma_c$ (MPa)	$I_{s(50)}$ (MPa)	ANÁLISE EXPEDITA
R6	Extremamente elevada	>250	>10	A rocha lasca depois de sucessivos golpes de martelo e ressoa quando batida
R5	Muito elevada	100 – 250	4 – 10	Requer muitos golpes de martelo para partir espécimes intactos de rocha
R4	Elevada	50 – 100	2 – 4	Pedaços pequenos de rocha seguros com a mão são partidos com um único golpe de martelo
R3	Mediana	25 – 50	1 – 2	Um golpe firme com o pico do martelo de geólogo faz identações até 5 mm; com a faca consegue-se raspar a superfície
R2	Baixa	5 – 25	(*)	Com a faca é possível cortar o material, mas este é demasiado duro para lhe dar a forma de provete para ensaio triaxial
R1	Muito baixa	1 – 5	(*)	O material desagrega-se com golpe firme do pico de martelo de geólogo
R0	Extremamente baixa	0,25 – 1	(*)	Consegue-se marcar com a unha

(\*) – Não são consideradas minimamente fiáveis as correlações com a resistência à compressão simples.

### 2.1.3.1.3- Ensaio de resistência à carga pontual (Point Load Test)

Outro método para determinação da resistência à compressão uniaxial, é através do ensaio de resistência à carga pontual, descrito no Capítulo 3.2.1.

### 2.1.4 - Ângulo de atrito das fraturas

Este parâmetro foi definido tendo em conta a rugosidade das descontinuidades do maciço rochoso, e os resultados de alguns ensaios de inclinação progressiva (ensaio Tilt).

O ensaio Tilt consiste na utilização de uma amostra que contém uma superfície de descontinuidade, procedendo-se à sua inclinação até que ocorra o deslizamento da parte superior da amostra ao longo da superfície de descontinuidade, o valor dessa inclinação deve ser registado e corresponde ao ângulo de atrito.

Para classificar o ângulo de atrito das fraturas, considerou-se a classificação proposta pela ISRM (1981), que é apresentada na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Designação do ângulo de atrito (ISRM, 1981)

Símbolos	Ângulo de atrito	Designação
A1	> 45°	Muito elevado
A2	35° - 45°	Elevado
A3	25° - 35°	Médio
A4	15° - 25°	Baixo
A5	< 15°	Muito baixo

## 2.2 - Classificação Rock Mass Rating (RMR)

A caracterização dos maciços rochosos é realizada através das classificações geomecânicas, em que se utiliza um conjunto de propriedades identificadas por observação direta e ensaios realizados *in situ* ou em amostras recolhidas em sondagens. Estas classificações consistem também em sistematizar o conjunto de elementos geotécnicos que interessa caracterizar num maciço rochoso (Lima & Menezes, 2008). Bieniawski publicou uma classificação em 1973, que foi várias vezes atualizada, em 1979 e 1989, por ele mesmo (Hoek, 2000).

As classificações geomecânicas consideram parâmetros do maciço rochoso, e quantificam-nos através de valores ou pesos, de modo a caracterizar o comportamento do tipo de rocha e do maciço rochoso. No caso da classificação RMR os valores são quantificados de 0 a 100. A estas classificações estão implícitas lacunas de informação, devido à sua simplificação de forma a obter as propriedades geomecânicas dos maciços rochosos (Hudson & Harrison, 1997).

O sistema RMR (Rock Mass Rating) é constituído por seis parâmetros. Os primeiros cinco pontos estão representados na Tabela 2.9 (RMR básico), sendo que o sexto ponto está representado na Tabela 2.10. Todos estes parâmetros são essenciais para a definição do comportamento dos maciços rochosos. Os parâmetros da classificação RMR são:

- Resistência à compressão uniaxial do material rochoso intacto;
- RQD (“Rock Quality Designation”);
- Espaçamento das descontinuidades;
- Caraterísticas das descontinuidades;
- Influência da água;
- Orientação das descontinuidades.

Tabela 2.9 - Classificação geomecânica RMR de Bieniawski (1989)

Parâmetros	Valores ponderais						
	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Ensaio de compressão simples (MPa)		
<b>Ensaio de carga pontual (MPa)</b>	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2			
<b>Resistência à compressão Uniaxial (MPa)</b>	> 250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5 -25	1 - 5	< 1
Pesos	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>RQD (%)</b>	90 - 100	75 – 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
Pesos	<b>20</b>	<b>17</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>3</b>		
<b>Espaçamento das descontinuidades</b>	> 2 m	2,0 – 0,6 m	60 – 20 cm	20 – 6 cm	< 60 mm		
Pesos	<b>20</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>5</b>		
<b>Comprimento das descontinuidades</b>	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m		
Pesos	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>		
<b>Abertura</b>	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 – 1,0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm		
Pesos	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>0</b>		
<b>Rugosidade</b>	Muito rugosa	Rugosa	Ligeiramente rugosa	Ondulada	Suave		
Pesos	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>0</b>		
<b>Enchimento</b>	Nenhum	Duro < 5 mm	Duro >5 mm	Brando < 5 mm	Brando > 5 mm		
Pesos	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>0</b>		
<b>Grau de alteração</b>	Inalterado	Ligeiramente alterado	Moderadamente alterado	Muito alterado	Decomposto		
Pesos	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>0</b>		
<b>Presença de água (Condições gerais)</b>	Seco	Ligeiramente húmido	Húmido	Gotejando	Fluxo abundante		
Pesos	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>0</b>		

O último parâmetro da classificação RMR, a orientação das descontinuidades, constitui um fator de acerto do somatório dos valores ponderais dos outros parâmetros.

Tabela 2.10 - Efeito da orientação das descontinuidades (Bieniawski, 1989)

Orientação das descontinuidades relativamente ao eixo da escavação de um túnel						
Direção Perpendicular			Direção Paralela			Qualquer
Pendor favorável		Pendor desfavorável		Pendor		Pendor
45° a 90°	20° a 45°	45° a 90°	20° a 45°	45° a 90°	20° a 45°	0° a 20°
<b>Muito favorável</b>	<b>Favorável</b>	<b>Razoável</b>	<b>Desfavorável</b>	<b>Muito desfavorável</b>	<b>Razoável</b>	<b>Desfavorável</b>
<b>Orientação das descontinuidades</b>		<b>Muito Favorável</b>	<b>Favorável</b>	<b>Razoável</b>	<b>Desfavorável</b>	<b>Muito desfavorável</b>
<b>Peso para ajuste de RMR</b>	<b>Túneis</b>	0	-2	-5	-10	-12
	<b>Fundações</b>	0	-2	-7	-15	-25
	<b>Taludes</b>	0	-2	-25	-50	-60

O valor final de RMR é obtido através da soma destes seis parâmetros; conforme se pode verificar na Tabela 2.11, existem cinco classes distintas, relativamente à qualidade do maciço.

Tabela 2.11 - Classificação do maciço rochoso através da classificação RMR de Bieniawski (1989)

Classificação RMR					
<b>Somatório dos pesos</b>	100 – 81	80 – 61	60 - 41	40 – 21	≤ 20
<b>(índice RMR)</b>					
<b>Classes</b>	I	II	III	IV	V
<b>Qualidade do maciço</b>	Muito bom	Bom	Razoável	Mau	Muito mau

### 2.2.1 - Resistência uniaxial do material rochoso

É o primeiro parâmetro da classificação de Bieniawski. Conforme se pode verificar na Tabela 2.12, os valores da resistência à carga pontual e da resistência à compressão uniaxial, são utilizados pela classificação RMR para definir a resistência do material rochoso.

Os valores definidos deste parâmetro foram obtidos com a realização de ensaios de carga pontual.

Tabela 2.12 – Resistência do material rochoso na classificação RMR (Bieniawski, 1989)

Parâmetros	Valores ponderais						
Ensaio de carga pontual (MPa)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Ensaio de compressão simples (MPa)		
Resistência à compressão Uniaxial (MPa)	> 250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5 -25	1 - 5	< 1
Pesos	<b>15</b>	<b>12</b>	<b>7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>

### 2.2.2 - Rock Quality Designation (RQD)

O RQD corresponde ao segundo parâmetro da classificação RMR. O RQD é um sistema de classificação que foi desenvolvido por Deere (1967) (Tabela 2.13), e que fornece uma estimativa da qualidade do maciço, designadamente da sua fracturação.

Tabela 2.13 – Sistema de classificação da qualidade do maciço rochoso em função do índice RQD, adaptado de Deere et al. (1967)

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

O RQD é determinado através da caracterização de testemunhos de sondagens (Figura 2.2). Representa a relação, em termos percentuais, entre a soma de todos os testemunhos maiores que 10 cm e o comprimento total furado.

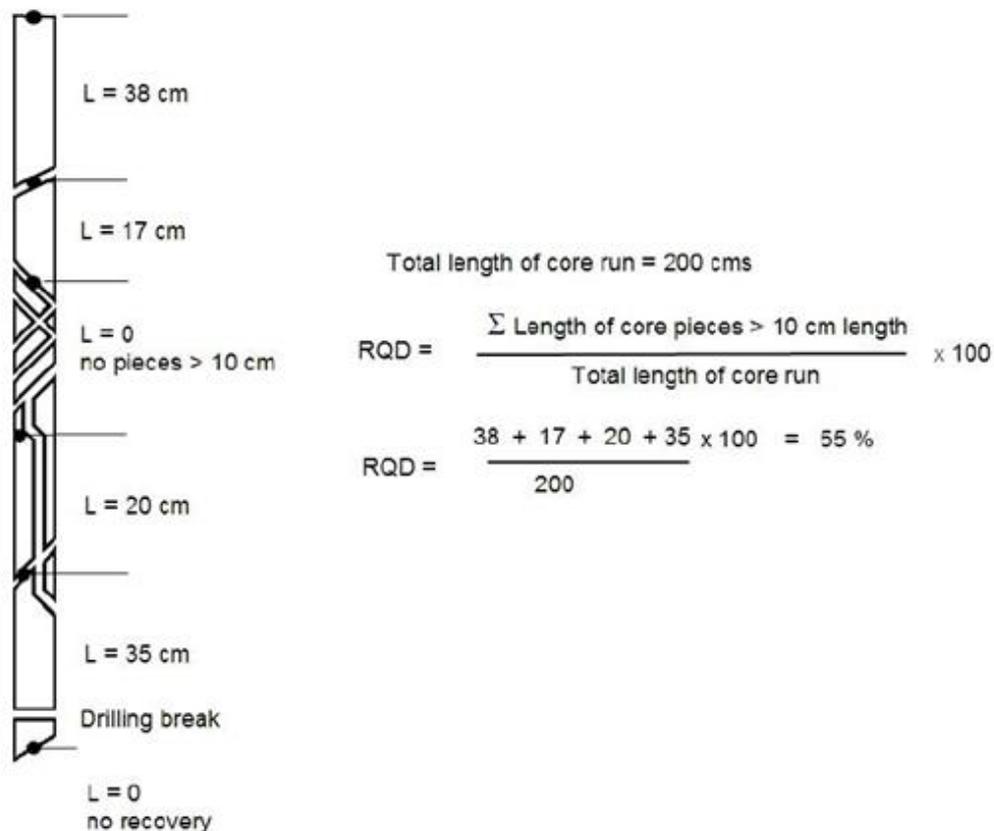


Figura 2.2 – Procedimento para a determinação do RQD através de testemunhos de sondagens (Deere, 1989)

Palmstrom (1982) sugeriu que na eventualidade de não existirem testemunhos de sondagem, o índice de RDQ pode ser calculado pela expressão 1:

$$RQD = 115 - 3,3 J_v \quad (1)$$

$$J_v = 1/s_1 + 1/s_2 + 1/s_3$$

em que  $J_v$  corresponde ao índice de fracturação volumétrica (somatório do número de descontinuidade por unidade de comprimento, para o conjunto de famílias de fraturas num maciço rochoso); o  $S$  é o espaçamento médio das fraturas das famílias.

### 2.2.3 - Espaçamento das descontinuidades

O espaçamento das descontinuidades corresponde ao terceiro parâmetro da classificação RMR. As propriedades e o comportamento mecânico das descontinuidades são condicionados por parâmetros físicos e geométricos (Vallejo et al., 2002) (Figura 2.3).

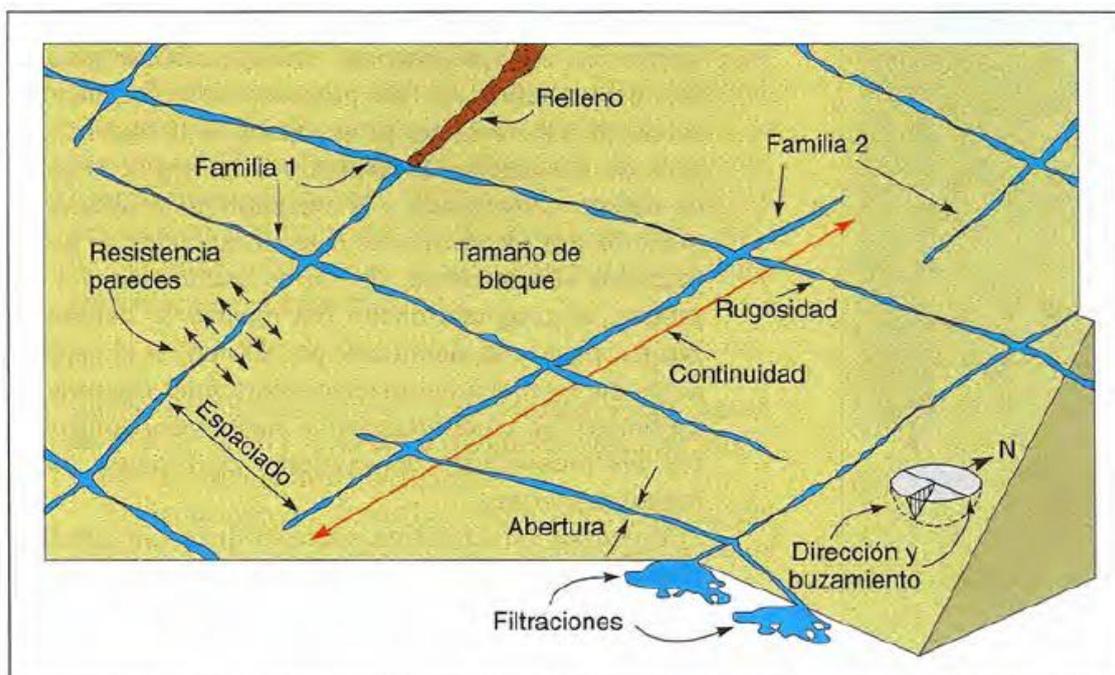


Figura 2.3 – Representação esquemática das propriedades geométricas das descontinuidades (Vallejo et al., 2002)

O espaçamento entre os planos de descontinuidade condiciona o tamanho dos blocos da matriz rochosa, definindo portanto, o papel que esta terá no comportamento mecânico do maciço rochoso, bem como a sua importância na influência das descontinuidades. Este espaçamento, medido normalmente com uma fita métrica, define-se como a distância entre dois planos de descontinuidade da mesma família, medida na direção perpendicular a esses planos (Figura 2.4).

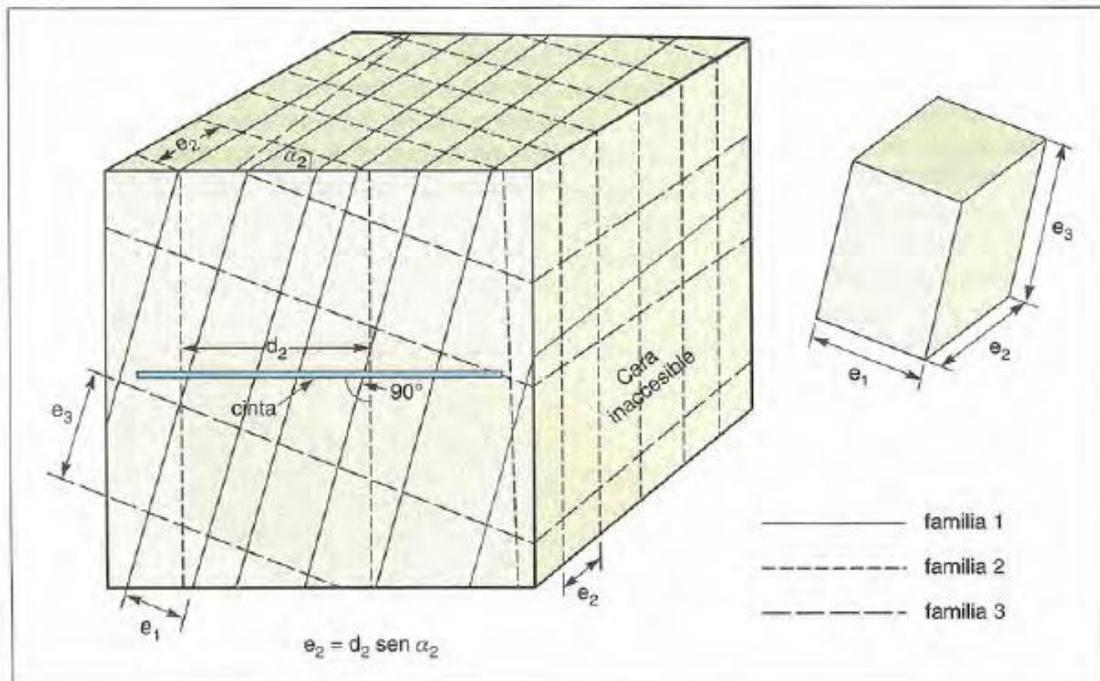


Figura 2.4 – Medida do espaçamento numa face do afloramento (ISRM, 1981).

Para definir o espaçamento das descontinuidades, considerou-se a classificação RMR (1989). Na Tabela 2.14, pode observar-se a classificação proposta pela ISRM (1981), que apresenta diferentes escalas de observação.

Tabela 2.14 – Classificação do espaçamento das descontinuidades (ISRM, 1981)

Classificação segundo o espaçamento	
Designação	Espaçamento (m)
Extremamente próximas	< 0,02
Muito próximas	0,02 - 0,06
Próximas	0,06 – 0,2
Moderadamente afastadas	0,2 – 0,6
Afastadas	0,6 – 2
Muito afastadas	2 – 6
Extremamente afastadas	> 6

#### 2.2.4 – Condições das descontinuidades

As condições das descontinuidades constituem o quarto parâmetro da classificação de RMR, estas condições dividem-se em cinco sub-parâmetros:

- Comprimento da descontinuidade
- Abertura
- Rugosidade
- Enchimento
- Grau de alteração

### 2.2.4.1 – Comprimento da descontinuidade

A continuidade de um plano de descontinuidade corresponde à sua extensão superficial máxima (Figura 2.5).

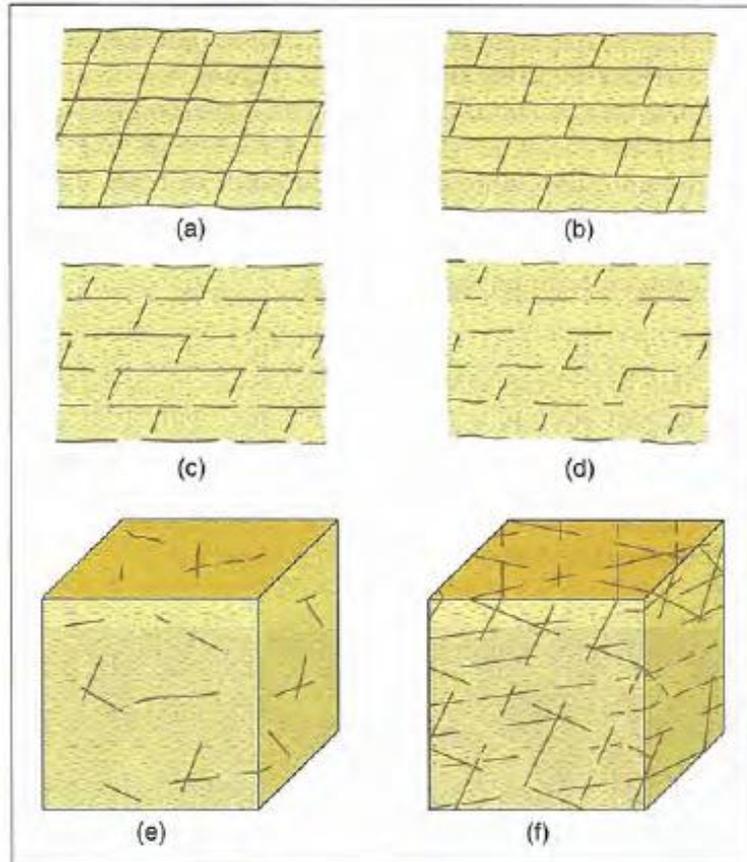


Figura 2.5 – Distintos modelos de continuidade de várias famílias de descontinuidades (ISRM. 1981)

É um parâmetro de enorme importância, mas de difícil quantificação devido às dificuldades de observação em afloramento e do prolongar da extensão das descontinuidades para o interior dos maciços.

É importante destacar as famílias de descontinuidades mais extensas, por geralmente serem estas que condicionam principalmente os planos de rutura do maciço rochoso (Vallejo et al., 2002).

Para definir a continuidade, considerou-se a classificação RMR (1989), sendo que na Tabela 2.15, pode observar-se a classificação proposta pela ISRM (1981).

Tabela 2.15 - Classificação da continuidade (ISRM, 1981)

Classificação segundo a Continuidade	
Designação	Comprimento da descontinuidade (m)
Muito pequena	< 1
Pequena	1 – 3
Média	3 – 10
Elevada	10 – 20
Muito elevada	> 20

#### 2.2.4.2 – Abertura da descontinuidade

A abertura é a distância existente entre as “paredes” da descontinuidade quando não existe preenchimento, é determinada perpendicularmente às superfícies das descontinuidades (Figura 2.6).

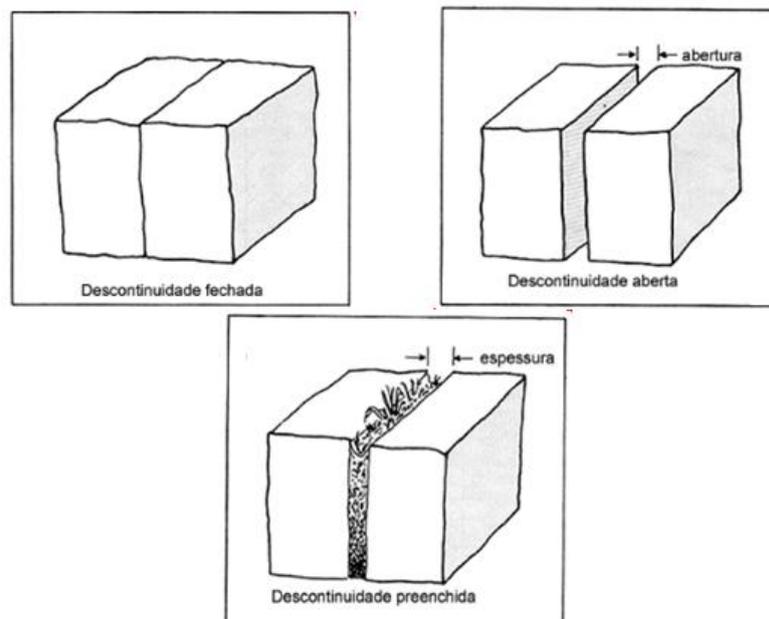


Figura 2.6 - Tipos de descontinuidade em função da abertura (ISRM, 1981)

É um parâmetro variável nos maciços rochosos. A influência da abertura na resistência tangencial das descontinuidades é importante inclusivamente nas descontinuidades consideradas como muito fechadas, modificando as tensões efetivas que atuam nas paredes.

Para definir a abertura das descontinuidades, considerou-se a classificação RMR (1989). Na Tabela 2.16, pode observar-se a classificação proposta pela ISRM (1981), que apresenta intervalos diferentes da classificação RMR.

Tabela 2.16 – Classificação da abertura (ISRM, 1981)

<b>CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A ABERTURA</b>	
<b>Designação</b>	<b>Abertura (mm)</b>
Muito fechadas	<0,1
Fechadas	0,1 – 0,25
Parcialmente fechadas	0,25 – 0,5
Abertas	0,5 – 2,5
Largas	2,5 – 10
Muito largas	10 – 100
Extremamente largas	100 – 1000
Cavernosas	> 1000

### 2.2.4.3 – Rugosidade da descontinuidade

A rugosidade das descontinuidades está relacionada com a resistência tangencial das superfícies das descontinuidades, podendo ser determinada através da caracterização “*in situ*”. A rugosidade pode ser definida através de diversos métodos, dependendo da precisão esperada, da escala de medida ou da acessibilidade do afloramento (Vallejo et al., 2002).

A resistência ao deslocamento ao longo das descontinuidades decresce com o aumento da abertura, bem como com a espessura do material de preenchimento.

Para a determinação da rugosidade pode utilizar-se a comparação visual das descontinuidades com os perfis padrão de rugosidade (Figura 2.7).

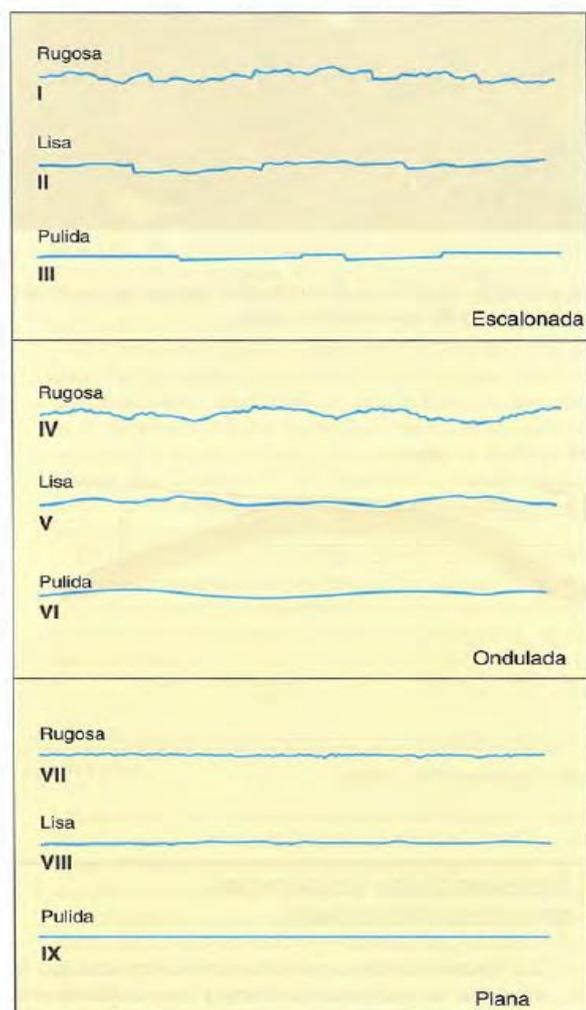


Figura 2.7 – Perfis de rugosidade (ISRM, 1981)

Para definir a rugosidade das descontinuidades, considerou-se a classificação RMR (1989), sendo que na Tabela 2.17, pode observar-se a classificação proposta pela ISRM (1981), que apresenta diferentes escalas de observação.

Tabela 2.17 – Classificação da rugosidade das superfícies das descontinuidades (ISRM, 1981)

Classificação da rugosidade	
Classe	Rugosidade
I	Rugosa ou irregular, em patamares
II	Lisa, em patamares
III	Espelhada (*), em patamares
IV	Rugosa ou irregular, ondulada
V	Lisa, ondulada
VI	Estriada (*), ondulada
VII	Rugosa ou irregular, planar
VIII	Lisa, planar
IX	Estriada (*), planar

(\*) o termo espelhado só deverá ser utilizado quando se observarem sinais óbvios de movimentação ao longo da descontinuidade.

#### 2.2.4.4 – Enchimento da descontinuidade

O material de enchimento corresponde ao material existente no interior das descontinuidades, é normalmente inexistente na maior parte das descontinuidades estudadas. Deve ter-se em consideração que tratando-se de materiais brandos ou alterados, podem ser submetidos a importantes variações das suas propriedades, designadamente na presença da água. Na Figura 2.8 podem observar-se várias descontinuidades com e sem enchimento.

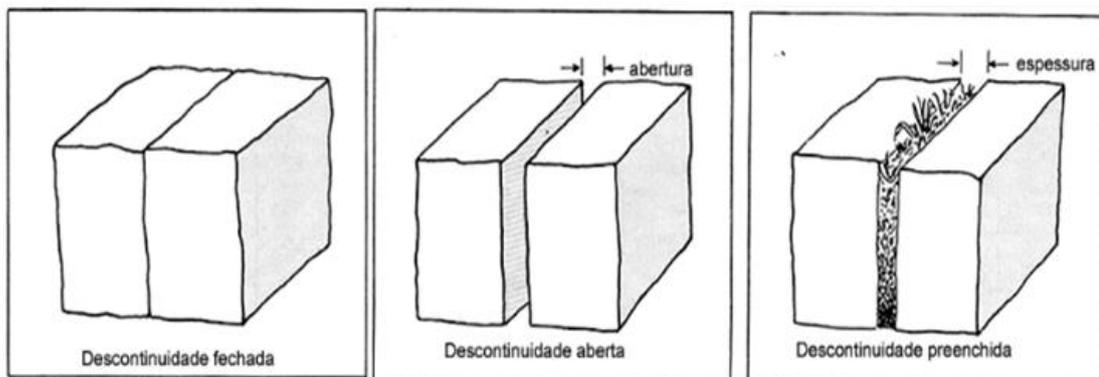


Figura 2.8 - Representação de descontinuidades fechadas, abertas e preenchidas (ISRM, 1981)

Na Tabela 2.18, são apresentados os diferentes tipos de enchimento, segundo Bieniawski (1989).

Tabela 2.18 – Diferentes tipos de material de preenchimento (Bieniawski, 1989)

Enchimento	Nenhum	Duro	Duro	Brando	Brando
		< 5 mm	>5 mm	< 5 mm	> 5 mm
<b>Pesos</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>0</b>

#### 2.2.4.5 – Grau de alteração da descontinuidade

Para definir o grau de alteração da superfície das descontinuidades presentes nos maciços rochosos, considerou-se a classificação RMR (1989), de modo a definir valores ponderais, para posterior cálculo do RMR.

#### 2.2.5 – Presença de água

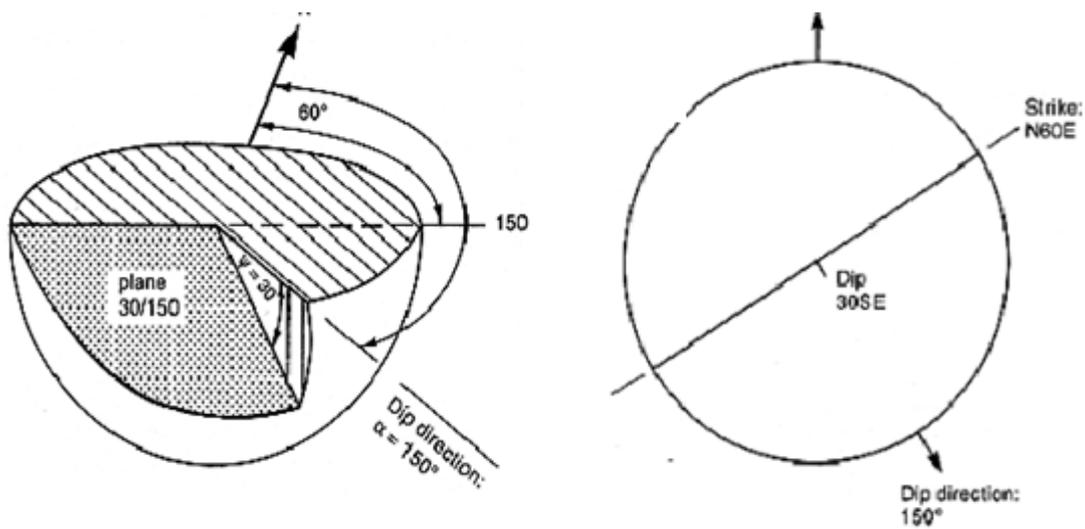
É o parâmetro 5 da classificação de Bieniawski. A água no interior do maciço rochoso, circula normalmente pelas descontinuidades, podendo por vezes, circular através da matriz rochosa. Para definir a classificação segundo a presença de água, considerou-se a classificação RMR (1989). Na Tabela 2.19, pode observar-se a classificação proposta pela ISRM (1981).

Tabela 2.19 – Classificação segundo a presença de água nas descontinuidades (IRSM, 1981)

<b>Classificação segundo a presença de água</b>		
<b>Classe</b>	<b>Descontinuidade sem enchimento</b>	<b>Descontinuidades com enchimento</b>
<b>I</b>	Fatura muito plana e fechada. Apresenta-se seca e sem a possibilidade de circular água.	Enchimento muito consolidado e seco. Não é possível a circulação de água.
<b>II</b>	Fatura seca sem evidências de fluxo de água.	Enchimento húmido sem a presença de água livre.
<b>III</b>	Fatura seca, com evidências de ter circulado água.	Enchimento molhado com presença de gotas ocasionais.
<b>IV</b>	Fatura húmida sem circulação de água livre.	Enchimento que mostra indícios de lavagem, com fluxo de água contínuo.
<b>V</b>	Fatura, ocasionalmente goteando, mas sem fluxo contínuo.	Enchimento localmente lavado, com fluxo considerável.
<b>VI</b>	Fatura com fluxo contínuo de água.	Enchimento completamente lavado, com pressões de água elevadas.

### 2.2.6 – Orientação das descontinuidades

Como se pode verificar na Figura 2.9, a orientação de uma descontinuidade pode ser definida pelo pendor, e pelo azimute da direção do pendor, definindo num pano horizontal, o ângulo  $\beta$ , medido a partir do Norte no sentido horário. A orientação das descontinuidades é fundamental no estudo de caracterização de um maciço rochoso.



$\beta$  – Azimute da linha de maior declive (dip direction)

$\Phi$  – Pendor da linha de maior declive (dip)

Figura 2.9 - Orientação de uma descontinuidade N60°E; 30° SE, (retirado de Lima & Menezes, 2008)

### 2.3 – Geological Strength Index (GSI)

Hoek (1994) e Hoek et al. (1995) desenvolveram o índice GSI (Geological Strength Index) com a finalidade de avaliar a qualidade do maciço de acordo com as características das descontinuidades, estrutura geológica, tamanho dos blocos e grau de alteração (Vallejo et al., 2002).

No índice GSI efetuaram-se algumas mudanças à classificação RMR principalmente para estimar a resistência à compressão do maciço rochoso. O índice GSI tem em consideração os primeiros quatro parâmetros da classificação RMR, nomeadamente a resistência á compressão da rocha, RQD, espaçamento das descontinuidades e ainda as condições das descontinuidades.

Na primeira proposta de Hoek (1994), o GSI era determinado pelo valor do RMR, revelando-se no entanto pouco fiável, especialmente para os maciços rochosos de má qualidade. A relação entre o GSI e o RMR é apresentada na expressão 2, que é utilizada para maciços com valores de  $RMR \geq 23$ .

$$GSI = RMR_{g9} - 5 \quad (2)$$

A expressão 3 é utilizada para maciços de má qualidade em que o valor de RMR é  $< 23$

$$GSI = \ln Q' + 44 \quad (3)$$

, sendo o Q, o índice de Barton.

No caso deste trabalho, o RMR determinado é superior a 23, em ambos os taludes, utilizando-se, deste modo, a expressão 2 para cálculo do Índice GSI.

O índice GSI pode ainda ser determinado através do gráfico representado na Tabela 2.20, proposto por Hoek & Marinos (2000), através das características das superfícies das descontinuidades com a geoestrutura do maciço considerado. Corresponde a um sistema de determinação rápido, baseado em simples inspeções visuais das condições geológicas reais.

Tabela 2.20 - Estimativa do índice GSI (Hoek & Marinos, 2000)

<b>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX - GSI</b> Índice Geológico de Resistência - maciços diaclásados (Hoek e Marinos, 2000) A partir da litologia, da estrutura do maciço, e das características das superfícies das suas descontinuidades, estimar o valor médio de GSI. Não ser demasiado preciso (é mais realista referir um intervalo de GSI= 33-37, que afirmar que GSI=35). É de referir que a tabela não tem validade para roturas determinadas pela estrutura do maciço. Quando ocorram descontinuidades desfavoravelmente orientadas, determinarão o comportamento da escavação. No caso de descontinuidades com preenchimento que se possa deteriorar com presença de humidade, resultando na diminuição da resistência ao corte, sugere-se o uso de valores mais à direita. A acção da pressão da água é analisada em função das tensões efectivas.		CARACTERÍSTICAS DAS SUPERFÍCIES DAS DESCONTINUIDADES				
GEOESTRUTURA		QUALIDADE DECRESCENTE DAS SUPERFÍCIES →				
INTERLIGAÇÃO DECRESCENTE ENTRE BLOCOS DE ROCHA ↓		MUITO BOAS Superfícies muito rugosas, sãs				
 INTACTA OU MACIÇA - rocha intacta ou maciça com descontinuidades em pequena quantidade e muito afastadas.		BOAS Superfícies rugosas, ligeiramente alteradas, com oxidação				
 COMPARTIMENTADO ("blocky") - maciço não perturbado, constituído por blocos cúbicos, bem travados entre si, definidos por 3 famílias de descontinuidades.		RAZOÁVEIS Superfícies suaves, moderadamente alteradas e desgastadas				
 MUITO COMPARTIMENTADO ("very blocky") - maciço parcialmente perturbado, com blocos angulares multi-facetados, travados entre si, definidos por 4 ou mais famílias de descontinuidades.		FRACAS Superfícies estriadas, fortemente alteradas, com preenchimentos arenosos				
 COMPARTIMENTADO/TECTONIZADO ("blocky/disturbed") - dobrado e/ou com presença de falhas, com blocos angulares definidos por várias famílias de descontinuidades. Persistência de xistosidade ou planos de fraqueza.		MUITO FRACAS Superfícies estriadas, fortemente alteradas, com preenchimentos argilicosos				
 DESINTEGRADO - maciço pouco interligado, fortemente partido, com mistura de fragmentos angulares e arredondados.						
 FOLIADO/LAMINADO - maciço foliado, dobrado e tectonizado. A estrutura do maciço é conferida pela presença de planos de xistosidade ou de corte pouco espaçados.						
		90			N/A	N/A
		80				
			70			
			60			
				50		
				40		
					30	
						20
		N/A	N/A			10
						5

## 2.4 – Norma ISO 14689-1 (2003)

Esta classificação, foi desenvolvida pela International Organization for Standardization (ISO, 2003) e tem como objetivo efetuar uma identificação e classificação das rochas. É uma classificação muito semelhante à classificação BGD (ISRM, 1981), até porque a classificação ISO teve por base, entre outras, a classificação BGD.

1 - Nesta classificação, a descrição do material rochoso é feita através:

- cor
- tamanho do grão
- matriz
- efeitos de resistência e alteração do material rochoso
- conteúdo de carbono
- estabilidade do material rochoso
- resistência à compressão simples.

A norma internacional ISO 14689-1 (2003), apresenta diversas tabelas com os parâmetros a utilizar na identificação e classificação da rocha. Na Tabela 1 da norma apresenta-se a classificação através da cor. Na Tabela 2 apresenta-se a classificação através dos efeitos de resistência e alteração do material rochoso. Na Tabela 3, pode ver-se a classificação de acordo com a estabilidade do material rochoso. A Tabela 4 dá a classificação através da estabilidade do material rochoso, após 24 horas de saturação em água. Na Tabela 5, pode constatar-se a classificação através da Resistência à Compressão Simples.

2 - A descrição do maciço rochoso inclui:

- tipos de rocha
- estrutura
- descontinuidades
- alteração
- águas subterrâneas

Na Tabela 6 da norma ISO 14689-1 (2003), podem ver-se os exemplos dos termos que são usados na descrição da estrutura do maciço rochoso. Na Tabela 7, pode observar-se a

classificação segundo o espaçamento das camadas. Na Tabela 8, é apresentada a classificação segundo o espaçamento das descontinuidades. Na Tabela 9, pode verificar-se a classificação segundo as dimensões dos blocos rochosos. Na Tabela 10, pode ver-se os termos que descrevem as estruturas e tamanho dos blocos do maciço rochoso principal. Na Figura 2 da norma ISO 14689-1 (2003) pode ver-se os termos para a rugosidade das descontinuidades. Na Tabela 11, são apresentados os termos para a abertura das descontinuidades. Na Tabela 12, pode ver-se os termos para descrever as taxas de infiltração das descontinuidades. Na Tabela 13, pode observar-se a escala dos estágios de alteração do maciço rochoso.

## CAPÍTULO 3. ENSAIOS LABORATORIAIS

No presente estudo, de caracterização geotécnica dos dois taludes, procedeu-se à realização de vários ensaios laboratoriais e “in situ” do material rochoso. Foi efetuada “in situ”, a determinação da dureza R com o auxílio do esclerómetro do tipo de Schmidt.

Os ensaios laboratoriais consistiram na caracterização física, como a determinação do teor em água, da porosidade e peso volúmico; ensaios de resistência, como o ensaio de carga pontual (“Point Load”), e ensaio de desgaste de “Los Angeles”; ensaios de durabilidade como a absorção em água e de desgaste em meio húmido e em meio seco (“Slake durability”); identificação mineralógica através da técnica de difração dos Raios X.

Os ensaios “in situ” e laboratoriais realizados permitiram complementar os resultados obtidos no levantamento de campo, em que se utilizaram as classificações BGD, RMR e GSI.

### 3.1 - Ensaio de caracterização física

#### 3.1.1 – Teor em água

O objetivo do ensaio de teor em água é a determinação da relação entre o peso da água presente numa amostra de rocha e o seu peso seco, essa relação é apresentada em termos percentuais.

Este ensaio foi realizado tendo em atenção as recomendações do ISRM (1978). No procedimento para a determinação do teor de água a amostra foi colocada numa cápsula previamente limpa e seca, determinando-se a sua massa. No caso das amostras rochosas utilizaram-se para cada determinação 8 fragmentos com valores superiores a 50 gramas e não superiores a 240 gramas.

As amostras de material rochoso foram colocadas na estufa a temperatura constante de 105°C, até os valores do peso das amostras secas na estufa permanecerem estáveis.

Fez-se uma nova pesagem das rochas, já secas, calculando-se deste modo o teor médio de água, em valores percentuais, através da relação entre o peso da água, que se perdeu no processo de secagem, e o peso das amostras secas na estufa.

### 3.1.2 – Porosidade e massa volúmica

Este ensaio laboratorial foi realizado de acordo com a norma CEN (1997), que é baseada na saturação das amostras no vácuo e em pesagens hidrostáticas.

O objetivo deste ensaio é calcular a porosidade e a massa volúmica do material rochoso que se pretende caracterizar.

As massas volúmicas são consideradas uma das propriedades básicas do material rochoso, sendo os seus valores influenciados pela composição mineralógica e pela porosidade (Bell & Culshaw, 1998).

Para este ensaio foram preparados 16 provetes homogêneos para cada talude. Foram posteriormente divididos em dois grupos. Os provetes foram depois secos em estufa durante cerca de 24h a uma temperatura constante de 100°C.

De seguida pesou-se individualmente cada provete e foram então colocadas num recipiente em que foram submetidas ao vácuo (Figura 3.1), mantendo-se uma pressão constante de  $2,0 \pm 0,7$  KPa durante 24h de forma a extrair o ar contido nas amostras.

Seguidamente foi introduzida água desmineralizada até as amostras ficarem completamente submersas durante 24h, e em que continuaram submetidas à ação do vácuo.

Abriu-se o recipiente de vácuo e deixou-se as amostras à pressão atmosférica por cerca de 24h. Posteriormente foi feita uma pesagem saturada e outra submersa (pesagem hidrostática) para permitir o cálculo da massa volúmica aparente e da porosidade.



Figura 3.1 – Recipiente para a realização do ensaio de determinação da massa volúmica e da porosidade aberta

O cálculo da massa volúmica aparente é dado pela expressão 4:

$$\mathbf{b} = \frac{\mathbf{m}_d \cdot \mathbf{r}_h}{\mathbf{m}_s - \mathbf{m}_h} \quad (4)$$

em que  $m_d$  é a massa seca do provete em gramas,  $r_h$  é a densidade da água expressa em quilogramas por metro cúbico (998 Kg/m<sup>3</sup>),  $m_s$  é a massa do provete saturado em gramas,  $m_h$  é a massa do provete submerso em gramas.

A porosidade aberta corresponde à relação entre o volume de vazios e o volume total do material rochoso, sendo a sua determinação obtida pela expressão 5:

$$\mathbf{P}_0 = \frac{\mathbf{m}_s - \mathbf{m}_d}{\mathbf{m}_s - \mathbf{m}_h} \quad (5)$$

em que  $m_s$  é a massa do provete saturado em gramas,  $m_d$  é a massa do provete seco em gramas,  $m_h$  é a massa do provete submerso em gramas.

De acordo com a nota 1 da norma prEN 1936 (CEN, 1997), e estando em conformidade com os provetes estudados, para rochas densas e ligeiramente porosas, as diferenças entre massa volúmica aparente e real são muito pequenas, pelo que se pode considerar o valor da massa volúmica aparente como o valor da real.

Nas Tabelas 3.1 e 3.2 podem verificar-se, respetivamente, as classificações dos valores da massa volúmica aparente e da porosidade aberta segundo a IAEG (1979).

Tabela 3.1 – Classificação dos valores da massa volúmica aparente de acordo com a IAEG (1979)

Classe	Massa volúmica aparente seca (kN/m <sup>3</sup> )	Descrição
1	< 18,35	Muito baixa
2	18,35 - 22,43	Baixa
3	22,43 - 25,99	Média
4	25,99 - 28,03	Elevada
5	> 28,03	Muito elevada

Tabela 3.2 – Classificação dos valores da porosidade de acordo com a IAEG (1979)

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

### 3.2 – Ensaio de resistência do maciço rochoso

#### 3.2.1 – Ensaio de resistência à carga pontual (“Point Load Strength Test”)

O ensaio da resistência à carga pontual ou *Point Load Strength Test* permite determinar a resistência dos materiais rochosos, obtendo-se o índice de resistência à carga pontual do material rochoso. A partir deste índice e através de correlações pode-se estimar a resistência à compressão uniaxial.

No presente trabalho, o ensaio foi realizado tendo em atenção as recomendações do ISRM (1985). Este ensaio tem como vantagem poder ser executado quer em campo, quer em laboratório, dado o equipamento utilizado ser portátil. O seu procedimento consiste na aplicação de carga concentrada de modo a provocar a rotura do material rochoso, através de um par de ponteiras cónicas (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Equipamento portátil utilizado no ensaio de resistência à carga pontual

A carga pontual requerida para levar à rotura do material rochoso é designada como  $P$  e deve proceder-se à medição da distância ( $D$ ) entre os dois pontos de aplicação de carga aos provetes de material rochoso.

A seleção dos provetes a ensaiar obedece aos parâmetros geométricos de acordo com as recomendações do ISRM (1985) e podem utilizar-se provetes cilíndricos, prismáticos e irregulares. Para os provetes cilíndricos os ensaios podem ser do tipo diametral ou axial (Figura 3.3).

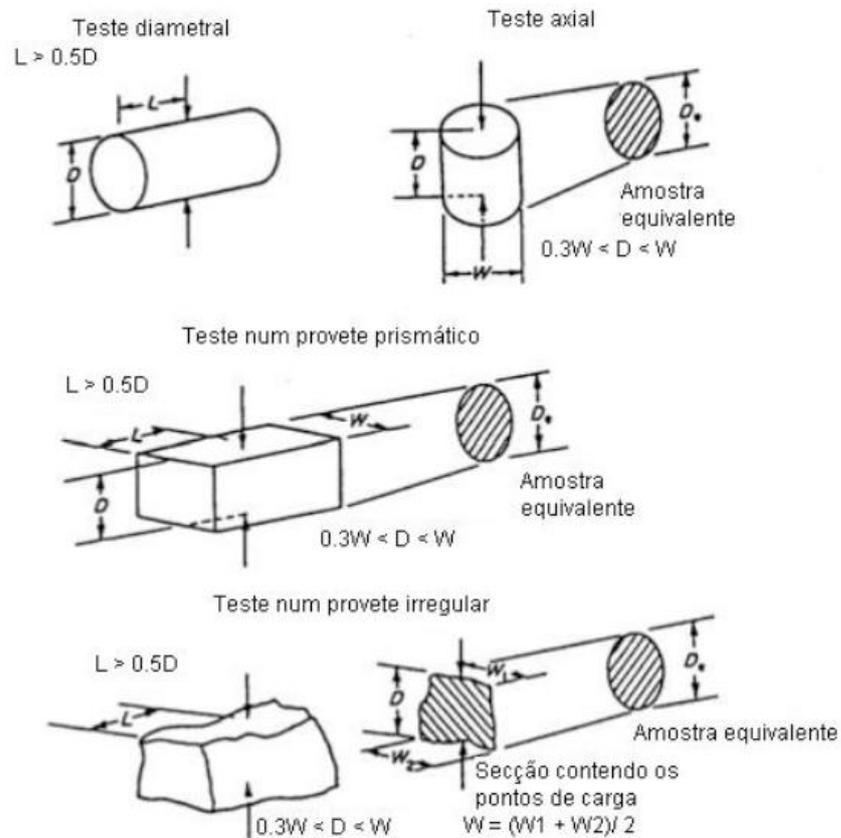


Figura 3.3 – Especificações das dimensões dos provetes a utilizar nos ensaios de resistência à carga pontual (adaptado de ISRM, 1981)

Neste trabalho foram efetuados, para cada talude, 24 ensaios com os espécimes à temperatura ambiente, 12 ensaios com os provetes totalmente saturados em água e 12 com os provetes completamente secos; estes últimos foram previamente colocados em estufa e com uma temperatura de cerca de  $100^{\circ}\text{C}$  por um período de 24 horas (Figura 3.4). O ensaio apenas foi efetuado utilizando provetes irregulares. Foram considerados válidos somente os resultados dos ensaios cuja superfície de rotura continha os pontos de aplicação da carga (Figura 3.5).



Figura 3.4 - Provetes utilizados no ensaio de carga pontual

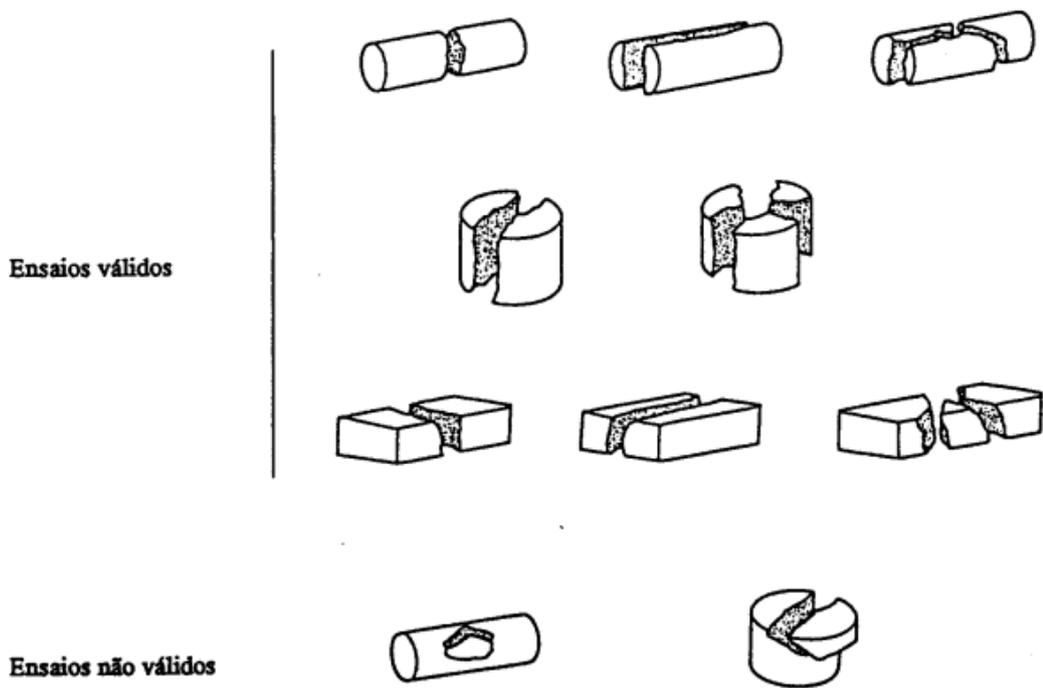


Figura 3.5 - Fraturas válidas e não válidas nos ensaios de carga pontual (ISRM, 1981)

Na Figura 3.6 pode ver-se um provete anteriormente e posteriormente à realização do ensaio.



Figura 3.6 – Proвете antes e depois da realização do ensaio de carga pontual

Nos ensaios deve ter-se em atenção a correção dos valores do índice de resistência de carga pontual ( $I_s$ ), calculado pela expressão (6):

$$I_s = P/D_e^2 \quad (6)$$

em que  $D_e$  é o diâmetro equivalente, no caso dos provetes irregulares este valor é definido pela expressão (7):

$$D_e^2 = 4 A/\pi \quad (7)$$

em que a área seccional dos provetes é definido como  $A$ , esta última de acordo com a expressão (8) corresponde a:

$$A = WD \quad (8)$$

em que  $W$  é a largura da seção transversal do provete na qual atuam as cargas, enquanto o  $D$  corresponde à distância entre as ponteiras cónicas que exercem a força sobre o provete. O índice de resistência à carga pontual corrigido corresponde ao valor que teria sido determinado num teste diametral, com  $D = 50$  mm. Nos casos em que o diâmetro seja diferente de 50 mm, deve efetuar-se uma correção, de modo a determinar-se o índice de resistência à carga pontual ( $I_{s(50)}$ ), de acordo com a expressão (9):

$$I_{s(50)} = F I_s \quad (9)$$

em que  $F$  corresponde ao fator de correção da dimensão, que por sua vez é obtido pela expressão (10):

$$F = (D_e/50)^{0,45} \quad (10)$$

O valor médio do índice de resistência à carga pontual deve ser determinado considerando pelo menos 10 valores válidos, devendo desprezar-se os dois valores mais elevados e os dois valores mais baixos resultantes dos testes com os provetes, com os valores restantes deve determinar-se a média.

O  $Is_{(50)}$  é designado como o índice de resistência à carga pontual corrigido para um diâmetro equivalente de 50 mm (ISRM, 1985). O valor de  $Is_{(50)}$  permite realizar estimativas viáveis da resistência de rochas anisotrópicas, inclusive quando os provetes apresentam formas irregulares. Multiplicando por fator K, convertem-se os valores de  $Is_{(50)}$  na resistência à compressão uniaxial. Apesar da grande variação dos valores de K proposta, entre 8 e 54 (Broch & Franklin, 1972; Bieniawski, 1975; Beavis et al., 1982; Foster, 1983; ISRM, 1985; Andrade & Saraiva, 2010), normalmente utilizam-se valores entre 16 e 25. Para as rochas mais brandas utilizam-se valores de K mais baixos, e para as rochas de maior resistência os valores de K são mais elevados. Por se tratar de uma rocha de resistência intermédia, neste trabalho foi utilizado um valor de K igual a 22.

### 3.2.2 – Ensaio “Los Angeles”

O objetivo deste ensaio é a determinação da percentagem de desgaste que o material rochoso, neste caso xistos de cor cinzenta a negra, sofre quando submetido ao método de abrasão Los Angeles. Este ensaio permite definir a resistência à fragmentação e desagregação.

Este ensaio foi realizado tendo em consideração a norma NP EN 1097-2 (2002). O material foi lavado e seco em estufa a uma temperatura de cerca de 110°C. Depois de seco, crivou-se o material em 2 crivos, com aberturas de 12,5mm e 11,2mm até se obter um total de 5Kg. Foi obtido cerca de 70% de material de granulometria mais grosseira e 30% de material de granulometria mais fina.

Verificada a limpeza interna do tambor (Figura 3.7), coloca-se a amostra e a correspondente carga abrasiva (11 bolas de metal com peso total de aproximadamente 4800g) (Figura 3.8).



Figura 3.7 – Tambor metálico usado na realização do ensaio de Los Angeles



Figura 3.8 – Carga abrasiva utilizada no ensaio de Los Angeles

O tambor deve ser colocado a rodar a uma velocidade de 30 a 33 rpm até completar 500 rotações. Retira-se todo o material do tambor, separam-se as esferas, e faz-se passar a amostra no peneiro de 1,6 mm rejeitando o material que passa. Por fim procedeu-se à secagem da fração retida no peneiro, efetuando-se o cálculo, do coeficiente de Los Angeles, utilizando a expressão 11:

$$LA = \frac{5000-m}{50} \quad (11)$$

em que  $m$  é a massa retida no peneiro de 1,6mm, em gramas.

A classificação do coeficiente Los Angeles para os agregados, segundo a norma FprEn 13242 (2011), apresenta-se na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Classificação do coeficiente Los Angeles para agregados (FprEn 13242, (2011))

Coeficiente Los Angeles	Categoria LA
≤ 20	LA <sub>20</sub>
≤ 25	LA <sub>25</sub>
≤ 30	LA <sub>30</sub>
≤ 35	LA <sub>35</sub>
≤ 40	LA <sub>40</sub>
≤ 45	LA <sub>45</sub>
≤ 50	LA <sub>50</sub>
≤ 60	LA <sub>60</sub>
> 60	LA <sub>Declarado</sub>
Não requerido	LA <sub>NR</sub>

### 3.3 – Ensaio de Durabilidade

#### 3.3.1 – Absorção de água

No ensaio de determinação de absorção de água pretende-se determinar a quantidade de água que o material rochoso pode absorver após a sua submersão durante 24 horas e 48 horas à pressão atmosférica normal. Os valores de absorção de água estão relacionados com a porosidade, fissuração e resistência do material rochoso.

A metodologia utilizada corresponde a uma adaptação das recomendações do ISRM (1981). Dividiram-se 48 provetes em 6 grupos (3 para cada talude), sendo que para cada ensaio se utilizaram 8 provetes que apresentam pesos compreendidos entre 80g e 808g (Figura 3.9).

As amostras foram colocadas na estufa até apresentarem um peso seco constante. De seguida as amostras foram pesadas e colocadas em recipientes com água por um período de 24 horas. Após esse tempo, foram retiradas, limpas com um pano húmido de modo a remover apenas a água existente à superfície, e pesadas. São novamente imersas por mais 24 horas, e ao fim desse tempo repetem-se os procedimentos de pesagem.

Foi ainda efetuado mais um ensaio, de 8 provetes para cada talude, mas com intervalos de tempo de 1 minuto, 2 minutos, 5 minutos, 10 minutos, 20 minutos, 30 minutos, 45 minutos, 60 minutos, 90 minutos, 135 minutos, 195 minutos, 315 minutos, 500 minutos, 24 horas e 48 horas, para verificar a absorção de água dos provetes nos primeiros minutos de submersão.



Figura 3.9 – Provetes utilizados na realização do ensaio de absorção de água

### 3.3.2 – Ensaio de desgaste em meio húmido (“Slake durability test”)

O ensaio do desgaste em meio húmido foi originalmente desenvolvido e estabelecido por Franklin & Chandra (1972). O objetivo deste ensaio é definir o desgaste provocado nas amostras rochosas devido à alternância de ciclos com a presença de água e de ação mecânica, bem como de secagem num determinado período de tempo. No presente trabalho para a realização do “slake durability test” utilizaram-se as recomendações da ISRM (1981). Utilizou-se também uma variante ao ensaio efetuando o desgaste em meio seco, de modo a avaliar o efeito da água no aumento do desgaste das amostras.

Foram efetuados para o material rochoso do primeiro talude 10 ensaios, 5 para desgaste em meio húmido e 5 para desgaste em meio seco; para o segundo talude foram efetuados 8 ensaios, 4 para desgaste em meio húmido e 4 para desgaste em meio seco.

Para cada ensaio foram utilizados 10 fragmentos de rocha, cada um com uma massa entre 40 a 60 gramas, de maneira que a massa total do material rochoso a ensaiar esteja compreendida entre 450 a 550 gramas (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Provetes usados na realização do ensaio de desgaste

Os fragmentos foram boleados de forma a evitar-se que as suas extremidades se apresentem angulosas. Os diferentes ciclos compreendem várias etapas. Numa primeira fase, os fragmentos foram colocados, durante várias horas, numa estufa a uma temperatura constante de 105° C, posteriormente procedeu-se à sua pesagem. Em seguida colocaram-se os fragmentos num tambor (Figura 3.11) que é imerso parcialmente em água e é sujeito a 200 voltas durante um período de 10 minutos, no final do qual as amostras foram retiradas do tambor e colocadas novamente na estufa.

Foram efetuados 2 ciclos, seguindo as recomendações da norma, mais um 3º ciclo adicional. Definiu-se que cada ciclo para o ensaio de desgaste em meio seco teve a duração de 1 hora em vez dos 10 minutos dos ensaios em meio húmido. Estas variações foram efetuadas no âmbito do trabalho e destinadas a melhor caracterizar o comportamento do material rochoso em presença/ausência de água.

O ensaio permite caracterizar a durabilidade do material rochoso ao desgaste e desintegração influenciada pelos processos de molhagem e secagem e ainda avaliar a

suscetibilidade do material rochoso à alteração, designadamente quando este se encontra exposto às condições climatéricas (Santi, 1998).

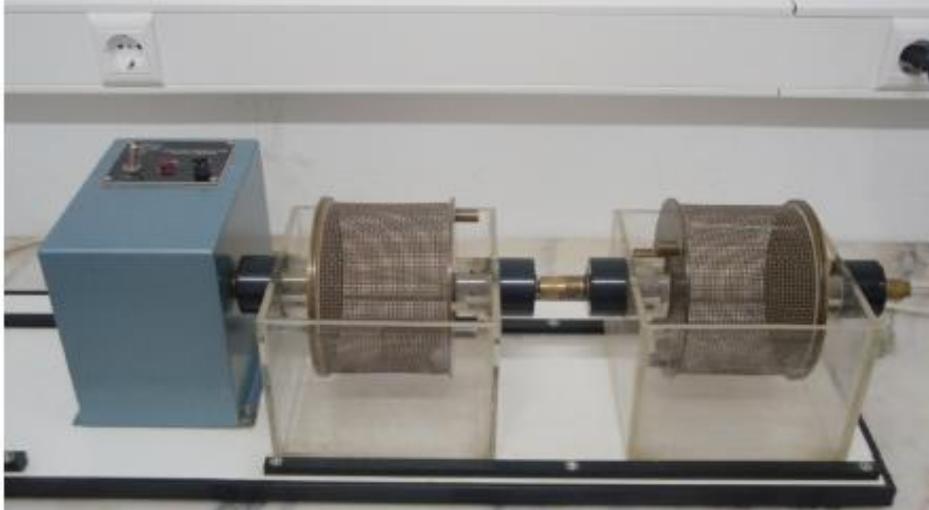


Figura 3.11 – Tambores usados na realização do ensaio de desgaste

Na tabela 3.4 observa-se a classificação utilizada por Aufmuth (1974) para os provetes após o 1º ciclo e na Tabela 3.5 é representada a classificação por Gamble (1971) utilizada para os provetes após o 2º ciclo, onde mostra as classificações do índice de durabilidade. O índice de durabilidade é o valor, em percentagem, da relação entre o peso da amostra retida e seca após cada ciclo e o peso inicial da amostra seca.

Tabela 3.4 – Classificação de Aufmuth (1974)

<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)

Tabela 3.5 – Classificação de Gamble (1971)

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



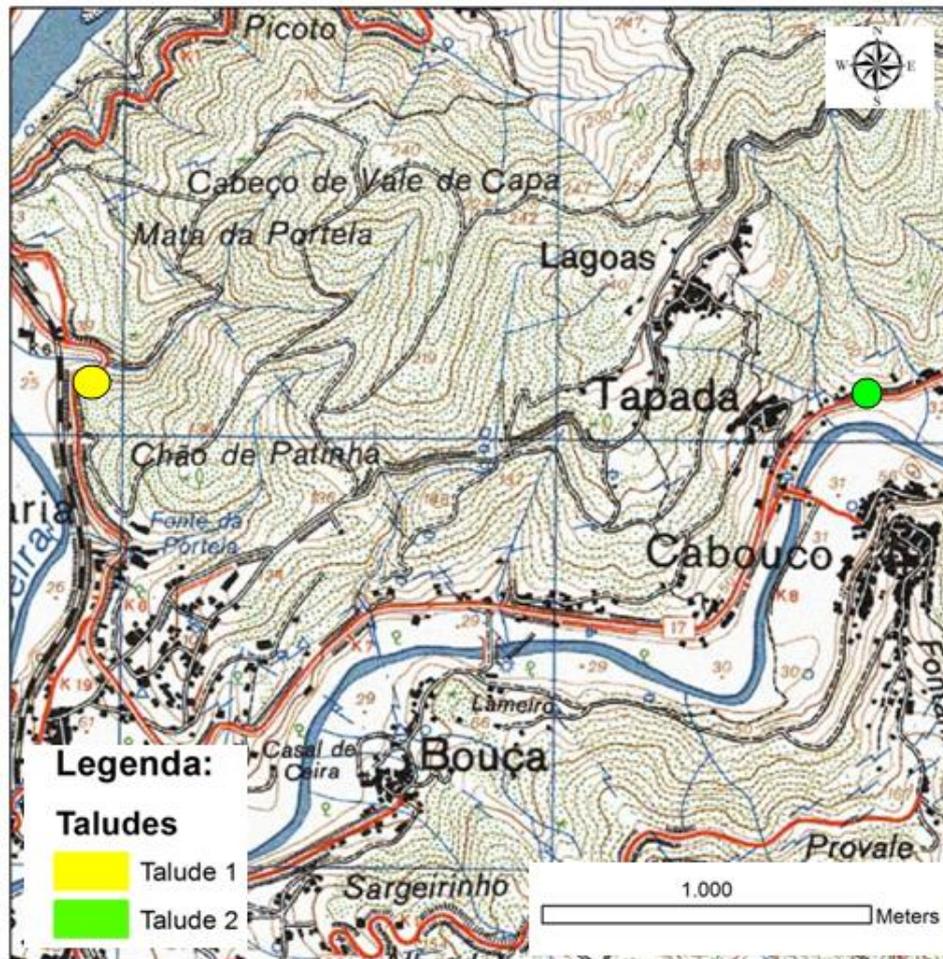


Figura 4.2 - Localização dos taludes na folha nº241 (Coimbra Sul) da Carta Militar de Portugal elaborada pelos Serviços Cartográficos do Exército (1984).

Nas Figuras 4.3 e 4.4 pode observar-se a localização pormenorizada dos dois taludes, na folha nº241 (Coimbra Sul) da Carta Militar de Portugal, elaborada pelos Serviços Cartográficos do Exército (1984).



Figura 4.3 - Representação pormenorizada do Talude 1 na folha nº241 (Coimbra Sul) da Carta Militar de Portugal elaborada pelos Serviços Cartográficos do Exército (1984)



Figura 4.4 - Representação pormenorizada do Talude 2 na folha nº241 (Coimbra Sul) da Carta Militar de Portugal elaborada pelos Serviços Cartográficos do Exército (1984)

Pode-se visualizar a área de estudo, em que se localizam os dois taludes considerados (Figura 4.5), bem como cada um desses taludes de modo mais pormenorizado nas imagens disponibilizadas pelo Google Earth (2014) (Figuras. 4.6 e 4.7).

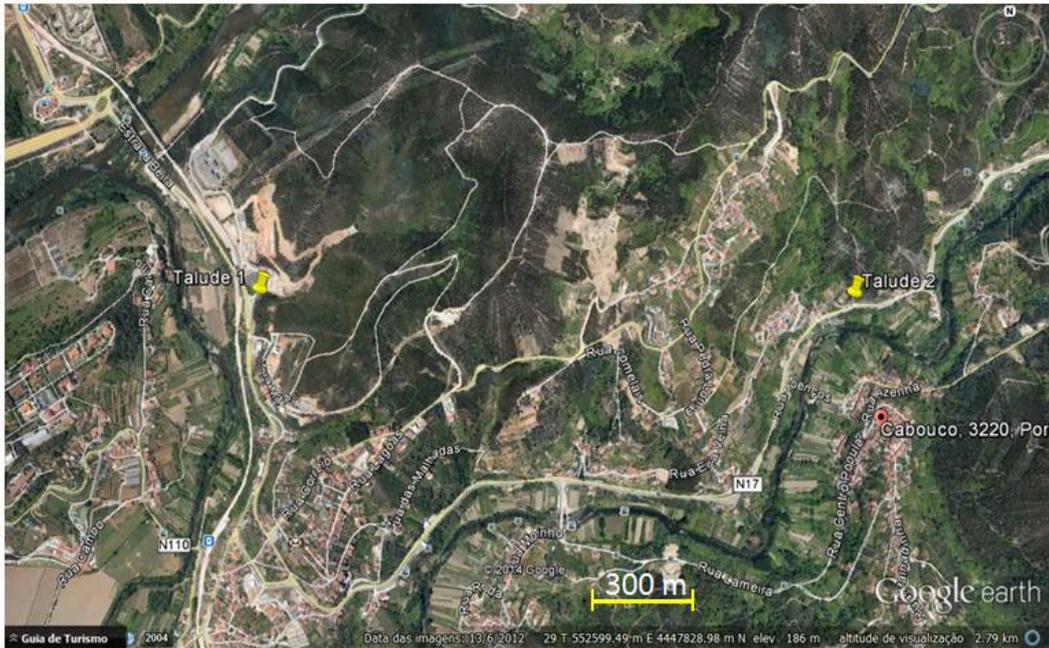


Figura 4.5 – Vista geral dos dois taludes (Google earth, 2014)



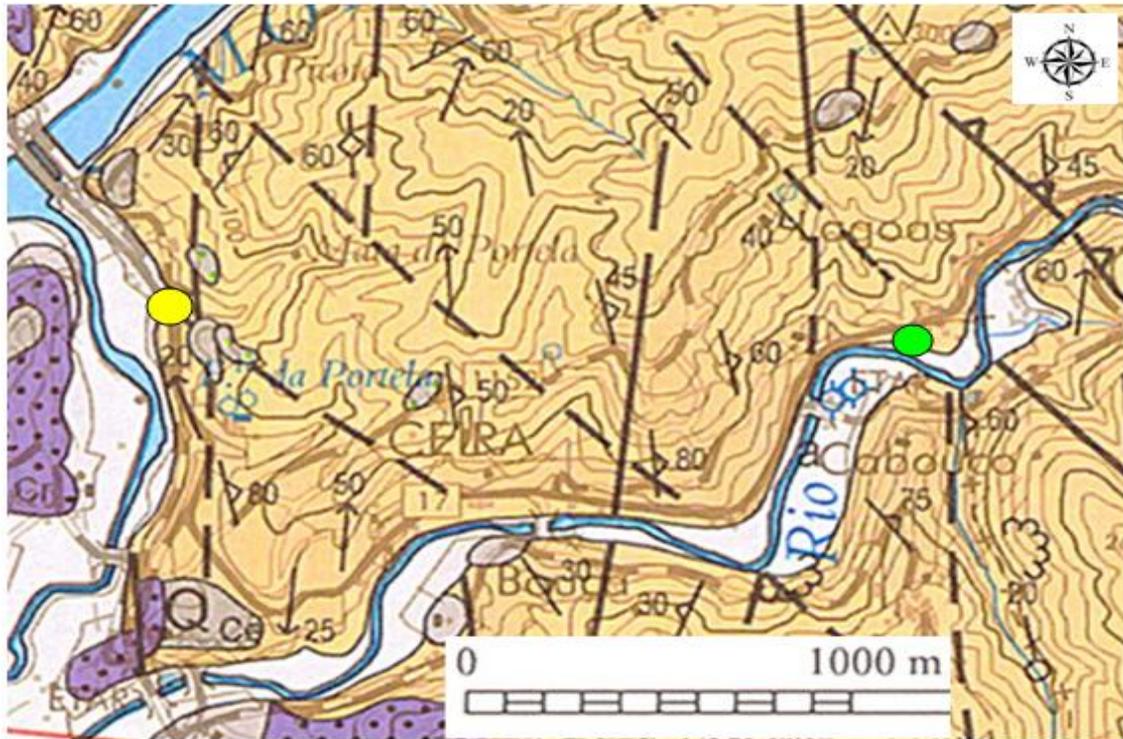
Figura. 4.6 - Localização do Talude 1 (Google earth, 2014)



Figura. 4.7 - Localização do Talude 2 (Google earth, 2014)

## 4.2 - Enquadramento geológico regional

A zona de trabalho pode ser observada na Figura 4.8 em extrato da Carta Geológica de Portugal, folha 19-D de Coimbra-Lousã à escala 1:50000, elaborada por Soares et al. (2007).



### Legenda:

#### Taludes

- Talude 1
- Talude 2

Formação de Conraria:  
conglomerados e arenitos

Série Negra:  
xistos cinzentos, xistos negros e metagrauvaques  
(\* Intercalações de quartzitos negros ( $P_{eSN}^*$ )  
\* (\*\* Intercalações de rochas básicas muito alteradas ( $P_{eSN}^{**}$ ))

$Q_{Sa}$  - Conglomerados  
de Salabardos  
  $Q_{Ce}$  - Depósitos  
de Ceira (T2)

Figura 4.8 - Localização dos 2 taludes em extrato da Carta Geológica de Portugal, folha 19-D. Coimbra-Lousã, elaborada por Soares et al. (2007)

O concelho de Coimbra é caracterizado pelo contraste geomorfológico entre o Maciço Hespérico ante-Mesozóico e a orla Meso-Cenozóica Ocidental. Este contraste verifica-se não só pelas estruturas morfológicas identificativas dos dois blocos distintos, nomeadamente pela evolução do rio Mondego, mas também pela litologia diferenciada que ambos apresentam com os metamorfitos precâmbricos do Maciço Hespérico e unidades gresosas e calcárias da Orla Meso-Cenozóica. Litoestratigraficamente, o sector de Coimbra-Lousã faz parte do conjunto da sequência metasedimentar do tipo Série Negra, onde é reconhecida uma alternância de filitos negros ou cinzentos escuros e metagrauvaques ou metaquartzogruvaques em bancadas de espessura variável, desde poucos centímetros até vários decímetros (Soares et al., 2007).

A maior parte da área urbana de Coimbra situa-se na Bacia Lusitaniana no sector setentrional da mesma (Rocha & Soares, 1984; Ribeiro et al., 1996).

A este da cidade de Coimbra localiza-se a zona de cisalhamento do Porto – Tomar – Ferreira do Alentejo que Burg et al. (1981) definem como sendo uma descontinuidade de 1ª ordem à escala litosférica. Ribeiro et al. (1995, 2003) consideram que esta descontinuidade permaneceu ativa ao longo da orogenia varisca, conectado a sutura SW-Ibérica com a sutura NW-Ibérica sobre as unidades do Precâmbrico, representadas pelo bloco soerguido da Série Negra que Soares et al. (2007) designam como Maciço Marginal de Coimbra. Esta zona de cisalhamento apresenta uma direção N-S na região de Coimbra. Na região de Coimbra a paisagem é profundamente marcada e retalhada por duas importantes famílias de falhas, uma com direções N5°-25°E, cuja atividade permanece até à atualidade, e outra com direção N55°E (Soares et al., 2007).

Nas proximidades do contacto com as fácies do Grupo das Beiras, são encontradas massas, diques e filões de rochas básicas muito alteradas o que torna impossível uma caracterização químico-mineralógica. São representativos dos termos hipabissais das sequências metavulcânicas do topo da série Negra. Na definição original da Série Negra (Carvalhosa, 1965), o conjunto metavulcano-sedimentar, situado a topo, está integrado na série.

O Grupo das Beiras data do Neoproterozóico e é constituído por duas unidades denominadas Formação de Caneiro e Formação de Boque-Serpins (Sequeira & Sousa, 1991).

A Formação de Caneiro apresenta-se predominantemente metagrauvaques em bancadas decimétricas a métricas, separados por intercalações de metapelitos laminados, de expressão mais reduzida. Estes grauvaques possuem, por vezes, no seu interior, leitões não contínuos de material argiloso, de tonalidades cinzentas escuras, similares às

intercalações xistentas da unidade, podendo ocorrer dobramentos sinsedimentares e clastos argilosos esparsos. Os metagrauvaques em termos petrográficos enquadram-se em dois tipos principais: metagrauvaques quartzo-feldspáticos com matriz quartzo-cloritico-sericítica e metagrauvaques líticos com fragmentos de quartzo, filitos e cherte (Sequeira & Sousa, 1991). Definiu-se uma espessura mínima de 300 metros, para a porção aflorante da unidade, embora a sua determinação seja difícil devido ao dobramento apertado e à ausência de horizontes-guia.

Foi definido por Sequeira & Sousa (1991), que a Formação de Boque-Serpins é a unidade que se sobrepõe à Formação de Caneiro, sendo essencialmente pelítica, maioritariamente constituída por metapelitos de tonalidade cinzenta escura, laminados e com intercalações de metagrauvaques em bancadas que não ultrapassam os 10-15m. Os pelitos laminados são constituídos por alternâncias de material arenoso fino ou siltítico e de material argiloso. No topo da unidade ocorrem quartzogruvaques espessos de cor negra (Sequeira & Sousa, 1991).

A passagem da Formação de Caneiro à Formação de Boque-Serpins é gradual e marca-se por predomínio de fácies de pelitos laminados.

Segundo Ribeiro et al. (1979) a evolução tectónica da bacia Lusitaniana foi influenciada pelas falhas da Nazaré a Sul, e a de Porto-Tomar a Nordeste deste sector. Na área urbana de Coimbra destacam-se os depósitos Grés de Silves (Choffat, 1887; Palain, 1976) são predominantemente siliciclásticos, verificando-se a presença de sistemas aluviais (Palain, 1976; Azerêdo et al., 2003; Pimentel, 2005). Fazem parte deste grupo essencialmente três subunidades estratigráficas designadas de Camadas de Pereiros, Camadas da Conraria e Camadas de Castelo Viegas (Choffat, 1880; Carvalho, 1950; Mourtede et al., 1972; Soares et al., 1993; Rocha et al., 1996; Azerêdo et al., 2003).

Segundo Soares & Marques (1986), no Grupo de Silves a Norte do Tejo, são encontrados três problemas: as variações de fácies a nível das Formações de Conraria e de Castelo Viegas; o limite Triásico/Jurássico e consequente definição das idades relativas das Formações de Castelo Viegas e Conraria; a definição de uma fase tectónica triásica.

A Formação de Conraria assenta em discordância sobre unidades ante-mesozóicas e é constituída por duas subunidades: a subunidade inferior apresenta arcoses e subarcoses, muito grosseiras, conglomeráticas, subcompactadas a compactadas, possuindo estruturas oblíquas, apresentando espessura varável; a subunidade superior, muito presente na região de Coimbra, é constituída por areno-pelitos laminados, com estruturas oblíquas de baixo ângulo, ou estruturas onduladas, e ricos em fragmentos carbonosos (Soares et al, 2007).

A Formação de Castelo Viegas assenta de modo desconforme sobre a Formação da Conraria e em, alguns locais, em discordância sobre as rochas metamórficas precâmblicas. É constituída por duas subunidades areno-conglomeráticas, com uma espessura de cerca de 100m. Apresenta corpos de arcoses e subarcoses, grosseiras a muito grosseiras, subcompactas a compactas, evidencia ainda estruturas curvilíneas e oblíquas que se conjugam na composição de canais decamétricos (Soares et al., 2007).

A Formação de Pereiros, segundo Palain (1976) é de idade hetangiana, e compreende três subunidades: dolomias gresosas, de espessura entre 5 e 8m, com estratificação de corpos de pelitos, laminados, arenitos médios a finos e dolomitos gresosos de tonalidades amareladas a acastanhadas; grés com meniscoides, de espessura de aproximadamente 8m, apresentando corpos estratificados de arcosenitos médios a muito grosseiros e compactos, com raros calhaus de quartzo e quartzito, com estruturas oblíquas; margas e dolomias gresosas, cuja espessura varia entre cerca de 50m em Coimbra, para aproximadamente 80m em Penela. Apresenta camadas de espessura decimétricas a métricas, constituídas por pelitos areno-margosos (Soares et al., 2007).

### 4.3 – Enquadramento geológico local

Foi efetuado um trabalho relacionado com o estudo de dois taludes de xistos negros, nos quais se desenvolveram atividades de investigação relacionadas com a caracterização geológica e geotécnica.

A localização dos taludes pode ser observada na Figura 4.8. O Talude 1 localiza-se na rotunda de saída da Autoestrada A13, na confluência com a EN 17 em Ceira, e o Talude 2 é adjacente à EN 17, frente à povoação de Cabouco.

#### Talude 1

O talude 1 foi dividido em duas zonas, sendo que a primeira zona tem uma extensão de aproximadamente 5 metros e uma altura de 2 metros (Figura 4.9), enquanto a segunda zona tem uma extensão de aproximadamente 50 metros e uma altura de 10 metros (Figura 4.10). As duas zonas do talude encontram-se a cerca de 2 metros do eixo da via. A direção média do talude é, na zona A, N60°W, sendo o pendor subvertical, enquanto na zona B a direção é N85°W e o pendor 40°N. Os taludes enquadram-se no Complexo Cristalofílico, na formação constituída por xistos e metagrauvaques, no conjunto da sequência metasedimentar do tipo Série Negra (Proterozóico).



Figura 4.9 – Talude 1, zona A, localizado à saída da A13



Figura 4.10 – Talude 1, zona B, localizado à saída da A13.

Em termos litológicos o talude é constituído por xistos de grão fino, metagrauvaques e filões de quartzo (Figura 4.9). Os xistos apresentam minerais como o quartzo, a caulinite, clorite, vermiculite, moscovite, apresentando vestígios de pirite. Os xistos constituem a litologia predominante e apresentam metamorfismo pertencente à zona clorite-biotite verde, um grau de alteração e de fracturação moderadamente alto a alto, apresentando tonalidades acinzentadas claras a escuras, predominando estas últimas; têm uma tendência para a desagregação bastante menor que os xistos do Talude 2. Os planos de xistosidade são estruturas penetrativas porque afetam a totalidade do maciço rochoso, apresentando uma ligeira rugosidade na maior parte do talude. O talude apresenta poucas falhas que afetam a totalidade do maciço rochoso, sendo a extensão delas, em média, inferior a um metro. Apresenta algumas dobras fechadas, sendo que os filões de quartzo acompanham o dobramento.

As principais famílias de descontinuidades da zona A, tal como se pode observar no ANEXO II são: a xistosidade com orientação N-S, 56°E; a família T com orientação N50°E, 35°SE; a família F com orientação N53°E, 57°SE; e a família E com orientação N38°W, 48°SW (Figura 4.11). Para a zona B, tal como se pode observar no ANEXO III são: a xistosidade com orientação N8°E, 48°E; a família F com orientação N85°W, 85°S; e a família T com orientação N30°E, 44°NW (Figura 4.12)

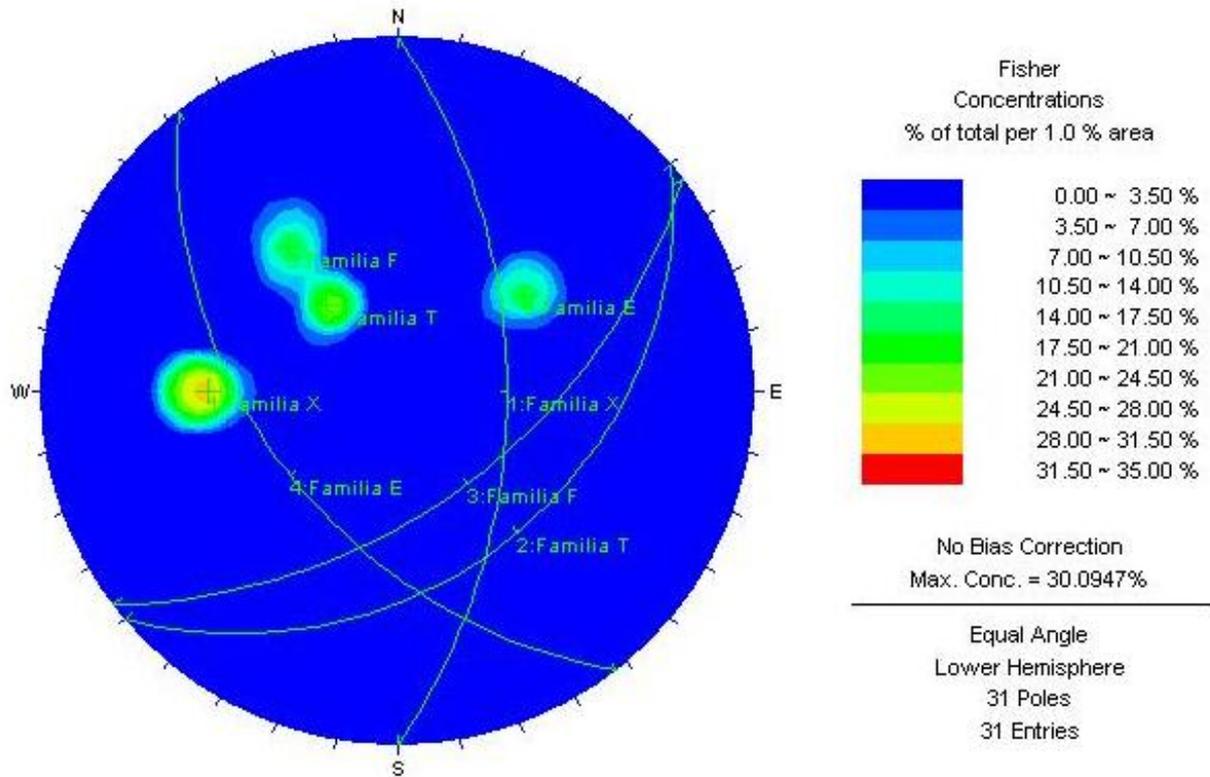


Figura 4.11 – Famílias de descontinuidade do Talude 1, zona A (Rocscience, 2004)

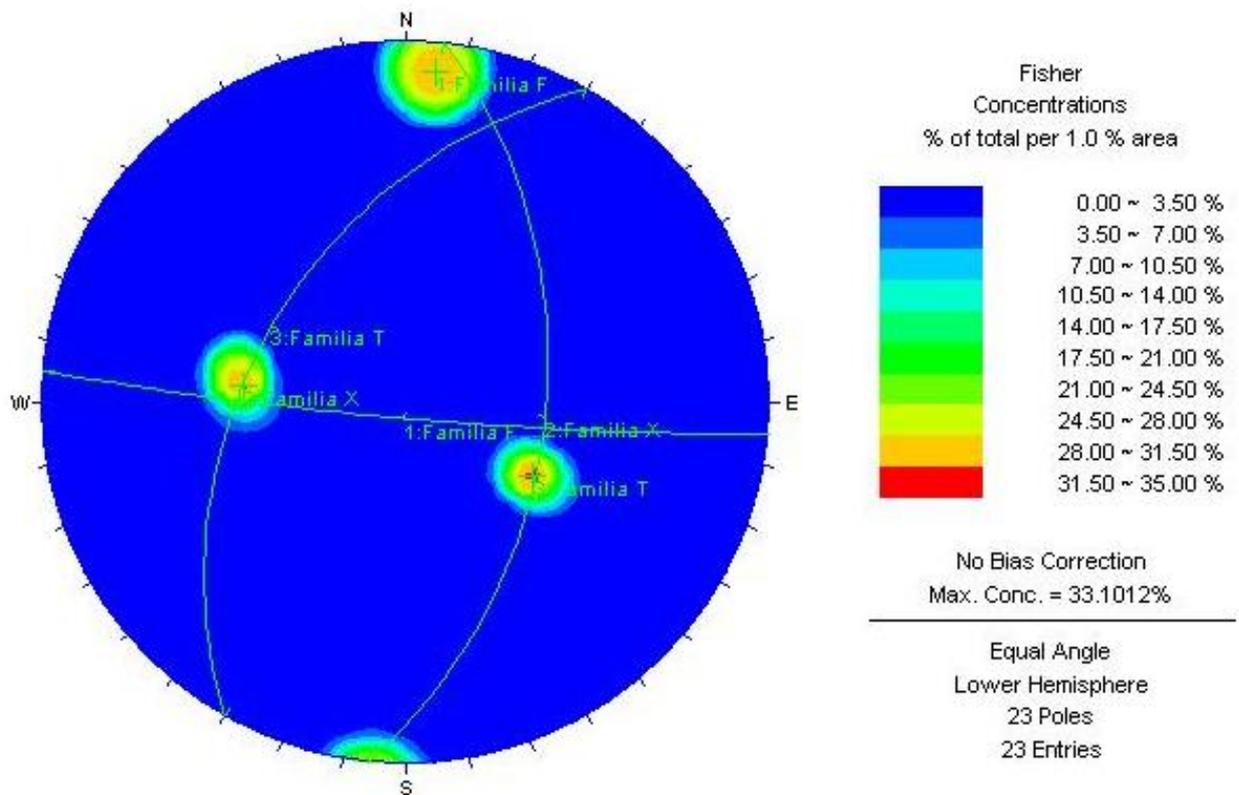


Figura 4.12 – Famílias de descontinuidade do Talude 1, zona B (Rocscience, 2004)

## **Talude 2**

O talude 2 tem uma extensão de aproximadamente 10 metros e uma altura de cerca de 15 metros (Figura 4.13). Encontra-se a cerca de 5 metros do eixo da EN 17. A direção média do talude é E-W sendo o pendor subvertical. O talude enquadra-se também no Complexo Cristalofílico, na formação constituída por xistos e metagrauvaques, no conjunto da sequência metasedimentar do tipo Série Negra (Proterozóico).



Figura 4.13 – Talude 2, localizado na EN 17 frente à povoação do Cabouco

Em termos litológicos o talude é constituído por metagrauvaques e xistos de grão fino, com intercalações de quartzo. Os xistos apresentam minerais mais argilosos como a illite e a caulinite, apresentando ainda quartzo, clorite, moscovite e vermiculite. Os xistos apresentam tonalidades acastanhadas a acinzentadas mais claras do que o Talude 1; têm uma desagregação variável, em algumas partes superiores aos xistos do Talude 1. Os xistos apresentam um grau de alteração elevado, designadamente nas proximidades de falhas e constituem a formação litológica predominante. Os planos de xistosidade e restantes discontinuidades possuem uma rugosidade pouco expressiva na maior parte da extensão do talude, sendo que em algumas zonas apresenta rugosidade mais acentuada. Ao longo dos planos de descontinuidade aparecem óxidos de ferro, sendo que existe

material de preenchimento quartzítico e argiloso ao longo das discontinuidades. O talude apresenta algumas falhas que afetam a totalidade do maciço rochoso, sendo a extensão delas, em média, superiores a um metro. Apresenta algumas dobras fechadas, sendo que os filões de quartzo acompanham os dobramentos.

As principais famílias de discontinuidades, tal como se pode observar no ANEXO IV são: a xistosidade com orientação N24° E, 69° W; a família S com orientação E-W, 67° S; e a família F com orientação N32° E, 22° SE (Figura 4.14).

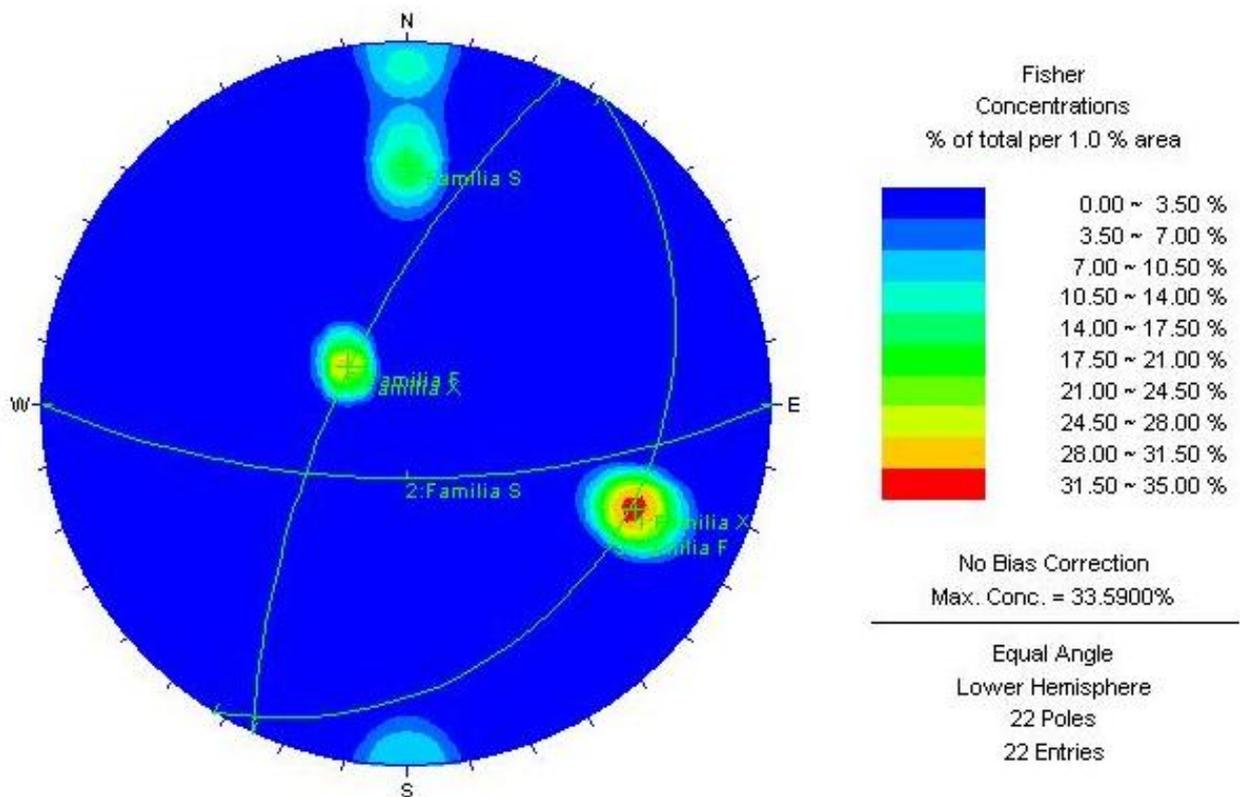


Figura 4.14 – Famílias de descontinuidade do Talude 2 (Rocscience, 2004)

# CAPÍTULO 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS

## 5.1 - Basic Geotechnical Description (BGD)

Com base na observação visual e com auxílio do martelo de geólogo, bússola, da fita métrica, esclerómetro do tipo Schmidt e a realização de ensaios de resistência à carga pontual foram determinados os parâmetros essenciais para descrever e caraterizar os taludes. Os parâmetros relativos às descontinuidades foram determinados tendo em atenção a classificação Basic Geotechnical Description (BGD) e a classificação Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989).

### 5.1.1 - Grau de alteração dos maciços rochosos

Este parâmetro foi estimado por observação visual, complementada com a utilização do martelo de geólogo, de forma a determinar a alteração do material do talude.

Segundo a ISRM (1981) considera-se a classificação de **W3** para ambas as zonas do maciço rochoso do Talude 1, e de **W4** para o do Talude 2.

O Talude 1, em ambas as zonas, foi considerado como sendo constituído por um maciço rochoso medianamente alterado, enquanto o Talude 2 apresenta um maciço rochoso muito alterado.

### 5.1.2 - Grau de fracturação dos maciços rochosos

Este parâmetro foi calculado com recurso a uma observação visual e do uso de fita métrica, de modo a medir-se o intervalo entre fraturas dos taludes.

Nos ANEXOS II, III e IV apresentam-se os resultados das medições efetuadas, para os 2 taludes, referentes a este parâmetro.

Tendo em consideração a classificação da ISRM (1981) apresenta-se na Tabela 5.1 o valor médio do espaçamento das descontinuidades e o respetivo grau de fracturação para os maciços dos 2 Taludes.

Tabela 5.1 - Classificação do grau de fracturação dos maciços dos 2 taludes

	Talude 1		Talude 2
	Zona A	Zona B	
<b>Intervalo entre fraturas (cm)</b>	23,4	17,3	13,3
<b>Grau de Fracturação</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>	<b>F4</b>

A zona A do Talude 1 apresenta um afastamento das descontinuidades, entre 20 a 60 cm. A zona B do Talude 1, tal como o Talude 2 apresentam intervalos próximos das descontinuidades, entre 6 a 20 cm.

### 5.1.3 - Espessura das camadas

Uma vez que se torna difícil observar a estratificação nos maciços xistosos dos Taludes 1 e 2, este parâmetro foi equiparado à xistosidade, devendo no presente caso adotar-se, na classificação BGD, a espessura como correspondente à xistosidade como **L5**.

### 5.1.4 - Resistência à compressão Uniaxial

Neste parâmetro determinou-se a dureza R com recurso ao esclerómetro do tipo de Schmidt, e depois correlacionaram-se esses valores com o ábaco do ANEXO I, para estimar a resistência à compressão uniaxial a partir da dureza de Schmidt.

O valor de peso específico utilizado no ábaco foi de 27,5 KN/m<sup>3</sup> para o Talude 1, e foi obtido pelo ensaio de massa volúmica aparente, descrito no capítulo 3.1.2, através da expressão 4. Como se mencionou no capítulo 2.1.3.1.1, efetuou-se apenas o ensaio no Talude 1, por não serem atingidos, no Talude 2, os valores mínimos para a realização do ensaio com o esclerómetro do tipo de Schmidt.

Para os ensaios foram seleccionados seis locais no total, três medições na zona A e três na zona B, todas elas perpendiculares à xistosidade e efetuando um ângulo de 45° com a horizontal.

De acordo com as recomendações ISRM (1978), foram efetuadas 20 determinações em cada local, sendo que os 10 valores mais baixos foram rejeitados procedendo-se à determinação com os 10 valores mais elevados. O ANEXO V apresenta os valores de

dureza R medidos em cada zona do talude, bem como o valor de Resistência à Compressão Uniaxial obtido.

Na Tabela 5.2 apresentam-se os valores médios da dureza R de Schmidt e da Resistência à Compressão Uniaxial obtidos através do ensaio do esclerómetro do tipo de Schmidt.

Tabela 5.2 – Valores médios da dureza de Schmidt (R) e da Resistência à compressão uniaxial das zonas A e B do Talude 1, calculada com os resultados do esclerómetro do tipo de Schmidt

	Zona A			Zona B		
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 1	Medição 2	Medição 3
<b>Valor Médio da Dureza R de Schmidt</b>	29,6	21,7	30,6	27,2	15,8	24,7
<b>Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)</b>	<b>69,7</b>	<b>46,2</b>	<b>68</b>	<b>58,7</b>	<b>35,3</b>	<b>53,5</b>
<b>Desvio Padrão (MPa)</b>	21,7	7,2	5,0	10,0	4,4	12,9

Segundo a classificação da ISRM (1981), e utilizando os valores médios da Resistência à Compressão Uniaxial da Tabela 5.2, pode-se assumir que a medição 2 da zona A, bem como as três medições da zona B apresentam uma resistência média, sendo classificadas por **S3**. As medições 1 e 3 da zona A apresentam resistência elevada, sendo classificadas por **S2**.

Os valores da resistência à compressão uniaxial calculados com os resultados de R, apresentados na Tabela 5.2, foram ligeiramente superiores ao valor médio obtido através do ensaio de resistência à carga pontual, cujo valor foi de 42,41 MPa (Tabela 6.5).

No Talude 2 não foi possível realizar o ensaio de martelo de Schmidt, sendo por isso necessário recorrer ao ensaio de carga pontual (“Point Load”) para determinação da resistência à compressão uniaxial.

O ensaio foi efetuado como é indicado no capítulo 3.2.1, e como se pode verificar na Tabela 6.5, o valor médio da resistência à compressão uniaxial dos ensaios realizados para o Talude 2 é de 15,5 MPa. De realçar que o valor da resistência à compressão uniaxial foi

obtido a partir de provetes cujo teor em água resultou da exposição às condições de ambiente em laboratório.

Segundo a ISRM (1981), pode considerar-se que o Talude 2 apresenta resistência baixa, sendo classificado como **S4**.

### 5.1.5 - Ângulo de atrito das fraturas

Este parâmetro foi estimado com recurso a uma observação visual, recorrendo à percepção tátil e aos ensaios de inclinação progressiva (ensaios Tilt).

Os valores do ângulo de atrito estabelecidos através do BGD foram comparados com os da classificação da rugosidade da classificação RMR.

Nos ANEXOS II, III e IV podem ver-se os resultados das medições efetuadas, para os 2 taludes, referentes a este parâmetro.

Segundo a ISRM (1981), a classe correspondente ao ângulo de atrito das discontinuidades presentes nos Talude 1 e 2 é apresentada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Classificação da classe do ângulo de atrito dos 2 taludes

	Talude 1		Talude 2
	Zona A	Zona B	
<b>Peso médio da rugosidade segundo RMR (1989)</b>	2,3	3	3,5
<b>Ângulo médio de atrito (ensaio Tilt)</b>	27°	27°	31°
<b>Classe do ângulo de atrito</b>	<b>A3</b>	<b>A3</b>	<b>A3</b>

Tendo em conta os resultados obtidos presentes na Tabela 5.3, pode considerar-se para ambas as zonas do Talude 1, tal como para o Talude 2, uma classe do ângulo de atrito A3, correspondente a um ângulo de atrito considerado médio.

Na Tabela 5.4 pode observar-se a caraterização dos maciços de um modo sintético de acordo com o preconizado pela ISRM (1981), tendo em conta os resultados dos parâmetros obtidos nos capítulos 5.1.1 a 5.1.5. A zona A do Talude 1 é definida como “Xisto W3, F3, L5, S2, A3”; a zona B do Talude 1 é definida como “Xisto W3, F4, L5, S3, A3”; o Talude 2 é caracterizado por “Xisto W4, F4, L5, S4, A3”.

Tabela 5.4 – Caraterização dos maciços rochosos dos 2 Taludes de acordo com os resultados da classificação BGD

	Talude 1		Talude 2
	Zona A	Zona B	
<b>Litologia</b>	<b>Xisto</b>	<b>Xisto</b>	<b>Xisto</b>
<b>Grau de alteração</b>	W3	W3	W4
<b>Grau de fracturação</b>	F3	F4	F4
<b>Espessura das camadas</b>	L5	L5	L5
<b>Resistência à compressão uniaxial</b>	S2	S3	S4
<b>Ângulo de atrito</b>	A3	A3	A3

## 5.2 - Classificação Rock Mass Rating (RMR) ou de Bieniawski

Os parâmetros essenciais desta classificação foram descritos no Capítulo 2.2, e a sua estimativa, foi efetuada com base na classificação RMR (1989).

Foram consideradas no Talude 1, quatro famílias de descontinuidades na zona A, e três famílias na zona B. No Talude 2 foram definidas três famílias de descontinuidades.

### 5.2.1 – Resistência à compressão uniaxial

O parâmetro da resistência à compressão uniaxial foi determinado, como foi referido anteriormente, através da realização do ensaio de esclerómetro do tipo de Schmidt, *in situ*, e através do ensaio de resistência à carga pontual realizado em laboratório.

Na Tabela 6.5 apresentam-se os valores médios do  $Is_{(50)}$ , do desvio padrão e da resistência à compressão uniaxial obtidos na realização do ensaio. Segundo esses resultados, pode assumir-se, relativamente ao parâmetro da resistência à compressão uniaxial, segundo a Classificação RMR, os pesos de 4 e 2, respetivamente para os Taludes 1 e 2.

### 5.2.2 - Rock Quality Designation (RQD)

Como foi referido no Capítulo 2.2.2, este parâmetro fornece uma estimativa da qualidade do maciço através de testemunhos de sondagens, sendo calculado como exemplifica a Figura 2.2. Palmstrom (1982) sugeriu que na eventualidade de não haver testemunho, o índice de RDQ pode ser calculado pela expressão 1 (Capítulo 2).

Nos ANEXOS II, III e IV podem ver-se os resultados das medições efetuadas, para os 2 taludes, referentes ao espaçamento das descontinuidades.

O cálculo do parâmetro  $J_v$  (somatório do número de descontinuidade por unidade de comprimento, para o conjunto de famílias de fraturas), é indicado na expressão 1 (Capítulo 2).

Na Tabela 5.5, são apresentados os valores do cálculo  $J_v$ , juntamente com o RQD definido para os 2 taludes.

Tabela 5.5 - Cálculo do  $J_v$  e estimativa do RQD para os 2 taludes

	Talude 1		Talude 2
	Zona A	Zona B	
<b>Valor médio do espaçamento (cm)</b>	23,4	17,3	13,3
<b><math>J_v</math> (cm)</b>	18,2	17,8	29,5
<b>RQD (%)</b>	<b>55</b>	<b>56</b>	<b>18</b>

Segundo a classificação de Deere et al. (1967), considera-se a qualidade do maciço rochoso do Talude 1 como razoável, e o do Talude 2 como muito fraco.

Tendo em conta a classificação RMR, atribui-se os pesos de 13 para ambas as zonas do Talude 1 e de 3 para o Talude 2.

### 5.2.3 - Espaçamento das descontinuidades

Nos ANEXOS II, III e IV apresentam-se os resultados para os 2 taludes, relativas ao espaçamento das descontinuidades.

Segundo os resultados apresentados na Tabela 5.5, onde se pode observar o valor médio calculado do espaçamento para os 2 taludes, e tendo em conta a classificação RMR, os pesos atribuídos, para o Talude 1 são de 10 para a zona A e de 8 para a zona B, sendo que para o Talude 2 se atribuiu um valor ponderal de 8.

### 5.2.4 - Condições das descontinuidades

Este parâmetro é dividido em cinco sub-parâmetros, que influenciam diretamente as condições das descontinuidades; são eles: comprimento (continuidade), abertura, rugosidade, enchimento e alteração.

Nos ANEXOS II, III e IV, apresentam-se estes parâmetros, determinados para os 2 taludes.

Na Tabela 5.6, apresentam-se os valores ponderais definidos para cada um destes parâmetros, para os 2 taludes, segundo a Classificação RMR.

Tabela 5.6 – Pesos atribuídos segundo a Classificação RMR (1989), para as condições das descontinuidades.

	Talude 1		Talude 2
	Zona A	Zona B	
Valor médio da continuidade (m)	1,3	1,7	4,3
<b>Valor ponderal do RMR</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>
Valor médio da abertura (mm)	1 - 5	0,1 – 1,0	1 - 5
<b>Valor ponderal do RMR</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>1</b>
Valor médio da rugosidade (0-6)*	2,3	3	3,5
<b>Valor ponderal do RMR</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Valor médio do enchimento (0-6)*	4,3	3,5	2,6
<b>Valor ponderal do RMR</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>
Valor médio da alteração (0-6)*	2,7	2,7	1,6
<b>Valor ponderal do RMR</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>
<b>Soma de valores ponderais</b>	<b>14</b>	<b>18</b>	<b>12</b>

\* Valores ponderais, adaptado da Classificação geomecânica de Bieniawski (1989) (Tabela 2.9)

### 5.2.5 – Presença de água

Neste parâmetro procurou-se avaliar a existência de água no maciço rochoso dos dois taludes ou ao longo das suas descontinuidades; definiram-se igualmente os possíveis vestígios de percolação de água.

Os valores estimados para este parâmetro são semelhantes na totalidade do Talude 1, e do Talude 2, sendo que os valores do peso utilizados para classificar os taludes, segundo a classificação RMR, correspondem a uma média dos valores estimados da presença ou vestígios de percolação. Sendo assim, para o Talude 1, para ambas as zonas, o peso estimado é de 12, correspondente a um maciço rochoso praticamente seco; para o Talude 2, o peso estimado foi 11, correspondendo a um maciço bastante seco.

Este trabalho tem como principal objetivo efetuar a caracterização do material rochoso, sendo por isso efetuada uma classificação RMR básica, pelo que o parâmetro correspondente à orientação das descontinuidades, não foi utilizado, por ser um parâmetro vocacionado para a caracterização de maciços rochosos, onde se pretendem instalar obras de engenharia, que não é o objetivo deste trabalho.

Na Tabela 5.7 pode observar-se a classificação dos maciços rochosos de acordo com a classificação RMR (1989), tendo em conta os resultados dos parâmetros obtidos nos capítulos 5.2.1 a 5.2.5.

Tabela 5.7 – Valores ponderais do RMR (1989) dos maciços rochosos dos 2 Taludes

	<b>Talude 1</b>		<b>Talude 2</b>
	Zona A	Zona B	
Resistência à compressão uniaxial	4	4	2
RQD	13	13	3
Espaçamento das descontinuidades	10	8	8
<b>Condições das descontinuidades</b>			
Continuidade	4	4	2
Abertura	1	4	1
Rugosidade	2	3	4
Enchimento	4	4	3
Grau de alteração	3	3	2
Presença de água	12	12	11
<b>Soma dos valores ponderais do RMR (1989)</b>	<b>53</b>	<b>55</b>	<b>36</b>

Tendo em conta os valores da Tabela 5.7 e considerando a classificação da Tabela 2.11 (Capítulo 2), considera-se o maciço do Talude 1 de classe III, pertencendo o maciço do Talude 2 à classe IV.

### 5.3 - Geological Strenght Index (GSI)

O índice GSI, como foi referido no capítulo 2.3, quando o cálculo total da classificação RMR (1989) é igual ou superior a 23, pode ser determinado pela fórmula da expressão 2 (capítulo 2).

Na Tabela 5.8 visualizam-se os vários valores do índice GSI, obtidos através da fórmula da expressão 2 (capítulo 2), utilizando o valor médio do RMR determinado para as diferentes zonas do Talude 1 e também para o Talude 2. Na tabela 5.8 observa-se ainda o valor do índice GSI estimado através da representação do gráfico elaborado por Hoek & Marinos (2000), e que é apresentada na Tabela 2.20.

Tabela 5.8 – Valores calculados de RMR e de GSI

	Talude 1		Talude 2
	Zona A	Zona B	
<b>RMR</b>	<b>53</b>	<b>55</b>	<b>36</b>
<b>GSI calculado através da expressão 2</b>	<b>48</b>	<b>50</b>	<b>31</b>
<b>GSI estimado através da tabela (Hoek &amp; Marinos, 2000)</b>	<b>42 -52</b>	<b>42 -52</b>	<b>23 - 33</b>

O valor do índice GSI estimado através da Tabela 2.20, não constitui um valor preciso, sendo preferível referir um intervalo dada a imprecisão existente na observação e leitura do gráfico de Hoek & Marinos (2000).

A estrutura do maciço rochoso do Talude 1 é muito compartimentada, ou seja, o maciço é parcialmente perturbado, com as características das superfícies das descontinuidades a serem razoáveis, ou seja, moderadamente alteradas e desgastadas.

No Talude 2 a estrutura é compartimentada/tectonizada, ou seja, verifica-se a presença de um maciço dobrado e com presença de falhas, com as características das superfícies das descontinuidades a serem definidas como fracas, pois são fortemente alteradas, com algum preenchimento arenoso a argiloso.

# CAPÍTULO 6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

## 6.1 - Mineralogia e geoquímica

### 6.1.1 – Identificação dos minerais através da difração dos Raios x

A composição química de uma rocha é o produto de vários elementos químicos e das suas percentagens relativas que participam nos diversos minerais que formam o material rochoso, e que reflete em grande medida a composição mineralógica de uma rocha. Neste trabalho foi realizada uma caraterização mineralógica na amostra total da rocha com o objetivo de determinar a sua composição mineralógica. Para a realização deste ensaio foi utilizado o Difratómetro de Raios X Philips PW3710 Based.

Nas figuras 6.1 e 6.2 pode verificar-se o resultado do ensaio de difração dos raios X para o material rochoso presente em cada um dos taludes.

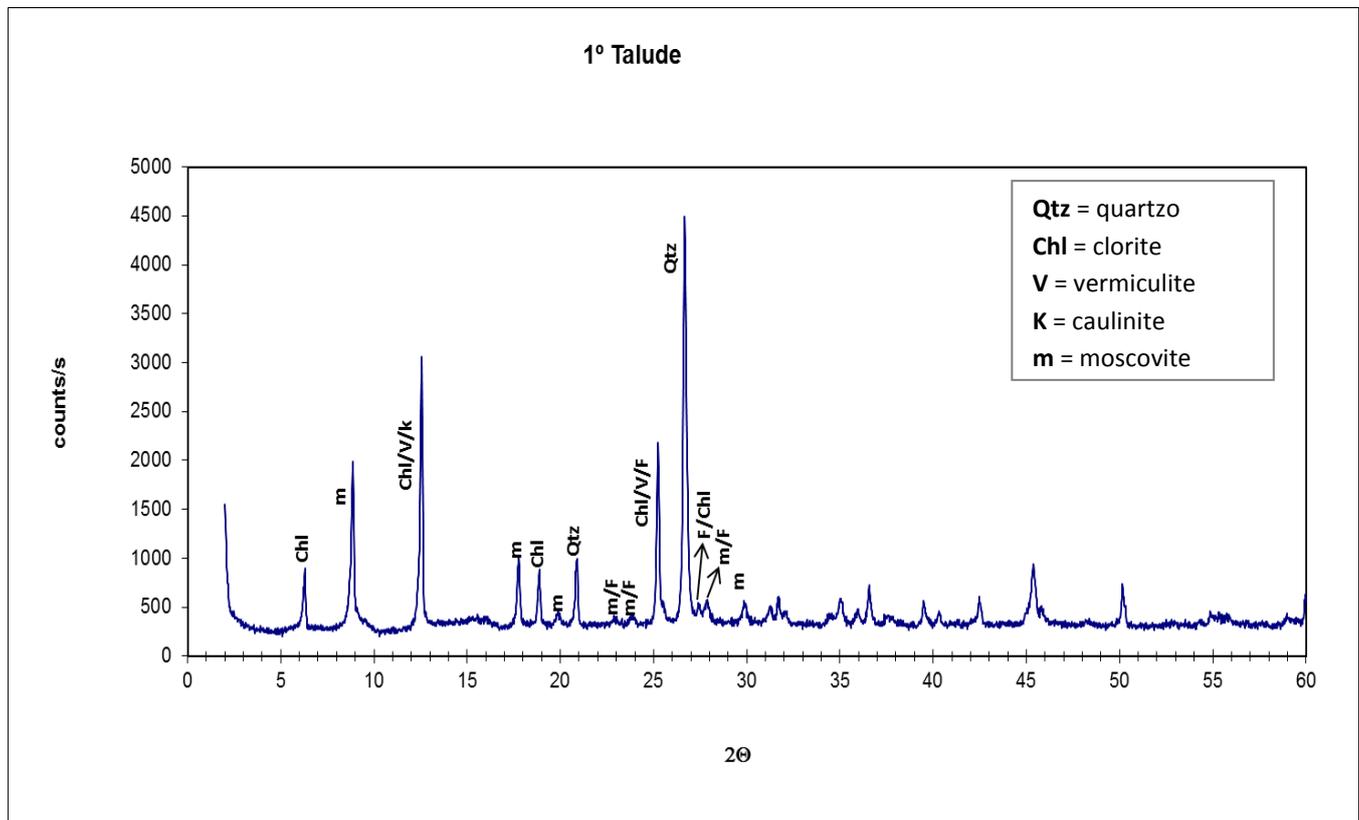


Figura 6.1 – Resultado do ensaio de difração dos Raios X para o material rochoso do Talude 1

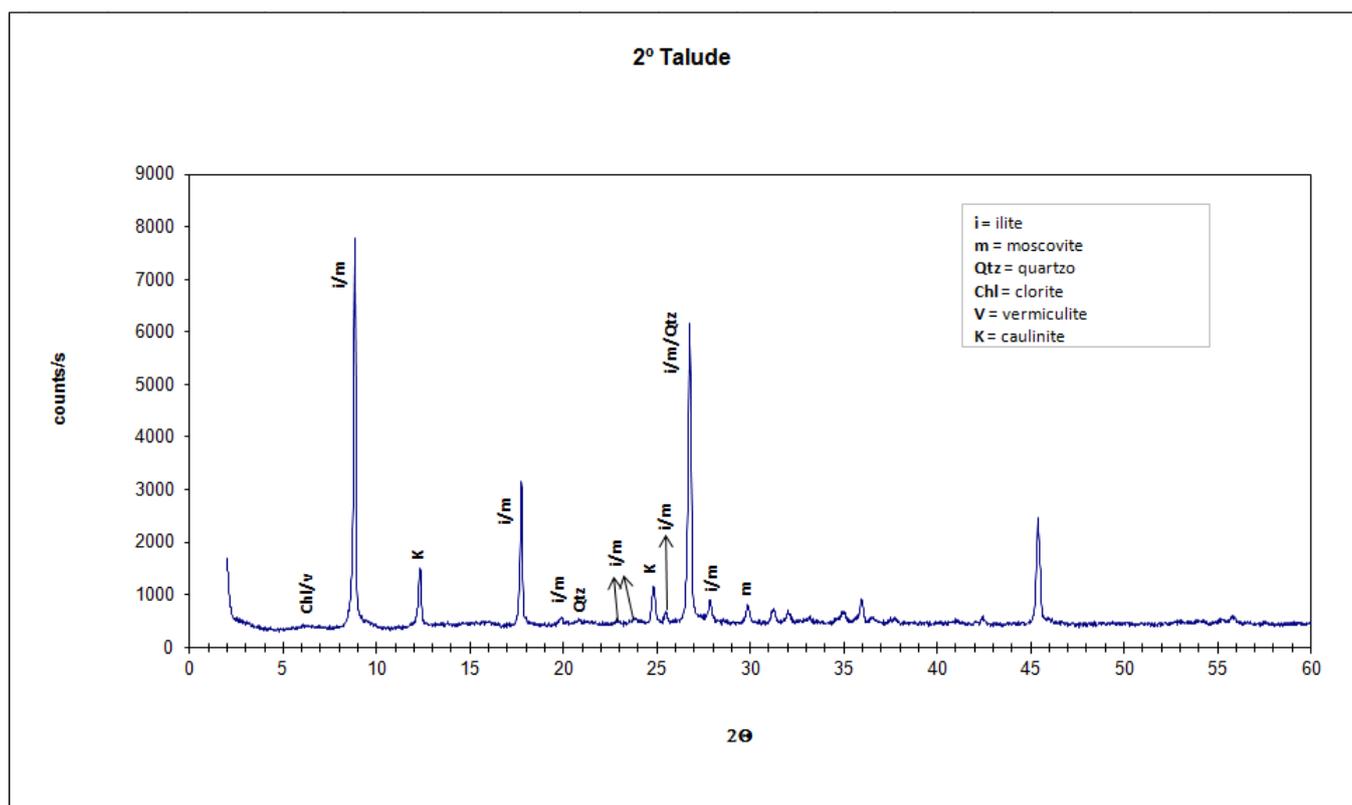


Figura 6.2 – Resultado do ensaio de difração dos Raios X para o material rochoso do Talude 2

Pode verificar-se que o Talude 2 é mais rico em minerais argilosos, como a illite, e a caulinite, apresentando também, maiores concentrações de muscovite. No Talude 1 encontram-se maiores concentrações de quartzo, sendo que no Talude 2 apareceu apenas de forma vestigial. Outro mineral que não foi detetado neste ensaio de difração de Raios X, foi a pirite, que foi encontrada esporadicamente no material rochoso do Talude 1.

## 6.2 - Ensaio de caracterização física

### 6.2.1 – Determinação do Teor em água

Para determinação do teor em água foram utilizadas amostras rochosas com grau de alteração W3 pertencentes ao Talude 1 e amostras rochosas com grau de alteração W4 pertencentes ao Talude 2. Na tabela 6.1 observam-se os resultados do teor de água obtido, para os xistos dos dois taludes.

Tabela 6.1 – Valor médio do teor em água obtido para os 2 taludes

	Teor em água médio (%)	Desvio padrão (%)
<b>Talude 1</b>	0,65	0,23
<b>Talude 2</b>	1,21	0,48

Os provetes do Talude 2 apresentam teores em água médio superiores aos provetes do Talude 1. Um dos fatores que influencia estes valores é a maior porosidade dos provetes do Talude 2, tal como se pode observar na Tabela 6.2.

### 6.2.2 – Porosidade aberta e massa volúmica

Na Tabela 6.2 estão presentes para os xistos dos 2 taludes, os resultados da massa volúmica aparente, segundo a expressão 4 (capítulo 3.1.2) e da porosidade aberta, segundo a expressão 5 (capítulo 3.1.2). Pode ver-se no ANEXO VI a tabela com os valores na íntegra.

Tabela 6.2 – Intervalo de valores da massa volúmica aparente e da porosidade aberta para os xistos dos 2 taludes

	Massa volúmica aparente (kN/m <sup>3</sup> )	Desvio Padrão (%)	Porosidade (%)	Desvio Padrão (%)
<b>Talude 1</b>	27,3 - 27,9	0,30 - 0,49	2,8 - 2,9	0,44 - 0,66
<b>Talude 2</b>	25,3 - 25,5	0,15 - 0,23	10,1 - 10,6	1,16 - 1,77

Foi realizado mais um ensaio para o Talude 1, utilizando amostras rochosas com grau de alteração W3, para comprovar o valor encontrado para a massa volúmica aparente, cujo valor se considerou elevado, tendo em conta os minerais presentes no material rochoso

e identificados através da técnica de difração dos raios X (Figura 6.1). Apesar de ausente no difractograma relativo aos xistos do Talude 1, foram observados macroscopicamente alguns minerais de pirite, o que poderá condicionar os valores da massa volúmica. Os resultados deste último ensaio, vieram confirmar os resultados anteriormente obtidos, como se pode verificar na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Novo cálculo da massa volúmica aparente e da porosidade aberta para os xistos do Talude 1

<b>Talude 1</b>		
<b>Amostra</b>	<b>Massa volúmica aparente (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Porosidade (%)</b>
1	27,2	2,7
2	27,2	3,2
3	27,2	3,6
4	27,2	2,8
5	27,2	3,1
6	27,1	3,1
7	27,1	3,3
8	27,1	3,7
<b>Valor Médio</b>	<b>27,2</b>	<b>3,2</b>
<b>Desvio Padrão (%)</b>	<b>0,05</b>	<b>0,35</b>

No Talude 1, os provetes apresentam uma massa volúmica aparente compreendida entre 27,1 kN/m<sup>3</sup> e 27,9 kN/m<sup>3</sup> e uma porosidade entre 2,7% e 3,7%. No Talude 2, os provetes apresentam uma massa volúmica inferior compreendida entre 25,3 kN/m<sup>3</sup> e 25,5 kN/m<sup>3</sup> e uma porosidade superior entre 10,1% e 10,6%.

Segundo a IAEG (1979), pode assumir-se que a classificação da massa volúmica para os xistos do Talude 1 é elevada e para os do Talude 2 é média; a porosidade para os xistos do Talude 1 é definida como baixa e considerada média para os xistos do Talude 2.

### 6.3 - Ensaios de resistência do material rochoso

#### 6.3.1 - Ensaio de resistência à carga pontual (“Point Load Test”)

Foram efetuados, para cada talude 24 ensaios com os espécimes secos ao ar, 12 ensaios com os provetes totalmente saturados e 12 com os provetes completamente secos. Estes últimos foram previamente colocados em estufa a uma temperatura de cerca de 100°C por um período de 24h. Foram utilizadas amostras rochosas com grau de alteração W3 pertencentes ao Talude 1 e amostras rochosas com grau de alteração W4 pertencentes ao Talude 2.

Os valores médios do  $Is_{(50)}$ , o respetivo desvio padrão e a estimativa da resistência à compressão uniaxial apartir da realização do ensaio da carga pontual, para os xistos dos 2 taludes, são apresentados na Tabela 6.4.

Os valores da resistência à compressão uniaxial foram obtidos através da multiplicação dos valores do  $Is_{(50)}$  pelo fator K, que apresenta normalmente valores entre 16 e 25. Para as rochas mais brandas utilizam-se valores de K mais baixos, e para as rochas de maior resistência os valores de K são mais elevados. Por ser uma rocha de resistência intermédia, neste trabalho foi utilizado um valor de 22.

Tabela 6.4 – Valores médios do  $Is_{(50)}$  desvio padrão e resistência à compressão uniaxial obtidos na realização do ensaio

	Provetes secos ao ar			Provetes saturados em água			Provetes completamente secos		
	$Is_{(50)}$ (MPa)	Desvio Padrão (%)	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	$Is_{(50)}$ (MPa)	Desvio Padrão (%)	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	$Is_{(50)}$ (MPa)	Desvio Padrão (%)	Resistência à compressão uniaxial (MPa)
<b>Talude 1</b>	1,93	0,49	42,41	1,64	0,6	36,09	3,38	0,79	74,29
<b>Talude 2</b>	0,71	0,24	15,51	0,5	0,13	11,04	1,99	0,37	43,8

Pode verificar-se, segundo os resultados obtidos, que a resistência à compressão uniaxial do material rochoso testado do Talude 2 é menor que no Talude 1, o que comprova, a qualidade superior do material integrante do maciço do Talude 1. Os valores mais elevados de resistência foram obtidos nas amostras completamente secas, diminuindo a

resistência com o aumento do teor de água, sendo a resistência intermédia para os provetes secos ao ar e os menores valores obtidos nos provetes saturados.

### 6.3.2 - Ensaio “Los Angeles”

Os resultados dos ensaios “Los Angeles” podem ser observados na Tabela 6.5 e foram determinados segundo a fórmula da expressão 11 (Capítulo 3).

Tabela 6.5 – Resultado do desgaste de LA, para os 2 taludes.

	Material Retido			LA (%)
	Peneiro 11,2mm (g)	Peneiro 12,5mm (g)	Peneiro 1,6mm (g) após o ensaio	
<b>Talude 1</b>	1722	3272	3688	<b>26</b>
<b>Talude 2</b>	1702	3302	2679	<b>46</b>

Pode verificar-se, segundo os resultados obtidos, um desgaste de aproximadamente 46% no material rochoso do Talude 2, enquanto no Talude 1, o desgaste foi de aproximadamente 26%.

A classificação do coeficiente Los Angeles, segundo a classificação para agregados da tabela 3.3 (Capítulo 3), é de LA<sub>30</sub> para o Talude 1 e LA<sub>50</sub> para o Talude 2.

## 6.4 - Ensaio de Durabilidade

### 6.4.1 – Teor em água de submersão/teor em água de saturação

Foram utilizadas amostras rochosas com grau de alteração W3 pertencentes ao Talude 1 e amostras rochosas com grau de alteração W4 pertencentes ao Talude 2.

Na Tabela 6.6 podem observar-se os resultados do teor em água de submersão para os xistos dos 2 taludes.

Tabela 6.6 – Valores de absorção dos 2 taludes

	Valor médio de absorção (%)		Valor máximo de absorção (%)		Valor mínimo de absorção (%)		Desvio Padrão dos valores médios (%)	
	24h	48h	24h	48h	24h	48h	24h	48h
<b>Talude 1</b>	1,14	1,25	2,90	2,98	0,32	0,46	0,64	0,66
<b>Talude 2</b>	3,35	3,60	4,38	5,13	1,13	1,33	0,73	0,82

Verifica-se valores mais elevados de absorção no material rochoso do Talude 2. Um dos fatores que leva a estes resultados é a maior porosidade dos provetes do Talude 2, tal como se pode observar na Tabela 6.2.

Na Figura 6.3 é apresentada a evolução dos resultados do ensaio para os provetes testados dos 2 taludes, ao longo de 48 horas.

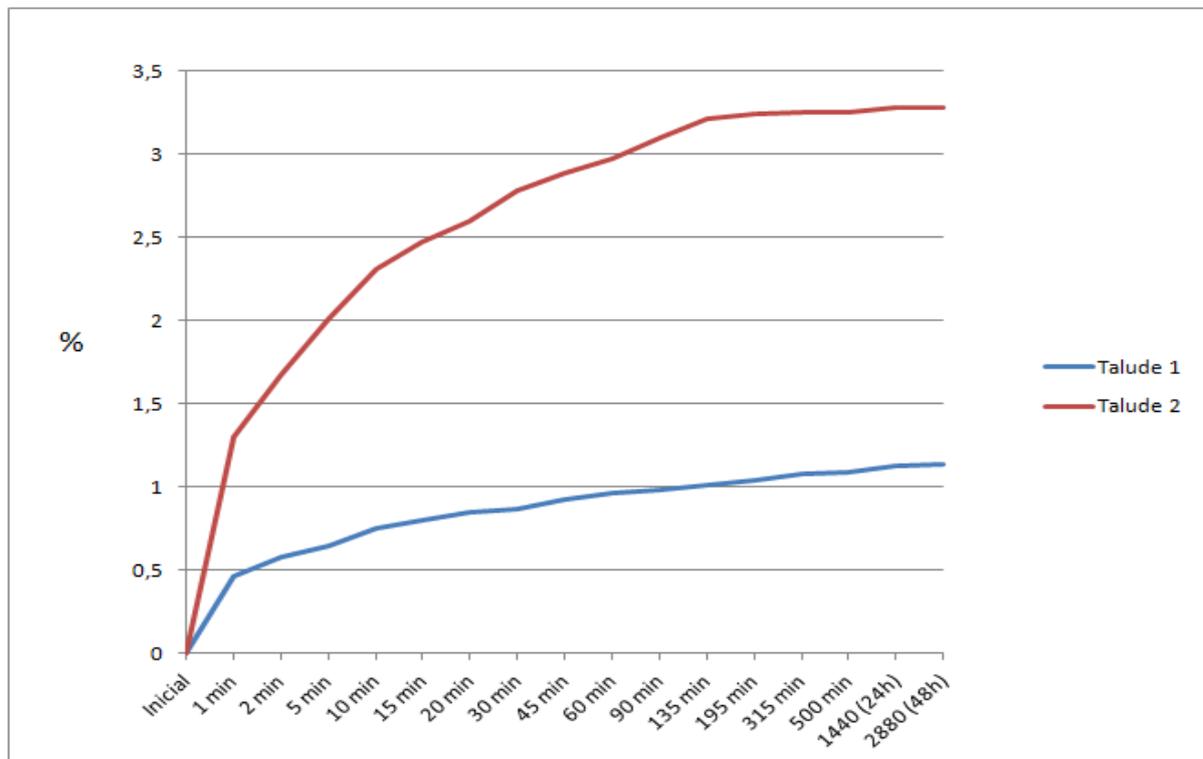


Figura 6.3 – Variação do teor em água de submersão ao longo do tempo

Pode verificar-se que em ambas as amostras rochosas dos taludes, o maior incremento dos valores percentuais de absorção ocorreu nos primeiros minutos, sendo que há uma estabilização nas amostras do Talude 1 ao fim de sensivelmente 24 horas, enquanto para os materiais do Talude 2 a estabilização verificou-se aproximadamente aos 135 minutos.

Na Tabela 6.7 apresentam-se os resultados do teor em água de saturação através do vácuo para os xistos dos 2 taludes.

Tabela 6.7 – Valores de saturação dos 2 taludes

	Valor médio de saturação (%)	Valor máximo de saturação (%)	Valor mínimo de saturação (%)	Desvio Padrão dos valores médios (%)
<b>Talude 1</b>	1,28	5,15	0,75	0,93
<b>Talude 2</b>	4,06	5,44	3,25	0,6

Verifica-se valores mais elevados de saturação nas amostras rochosas do Talude 2. A maior porosidade dos provetes do Talude 2 condiciona de uma forma importante os valores encontrados.

#### 6.4.2 - Ensaio de desgaste (“Slake durability”)

Foram utilizadas amostras rochosas com grau de alteração W3 pertencentes ao Talude 1 e amostras rochosas com grau de alteração W4 pertencentes ao Talude 2.

Os resultados, em meio seco e em meio húmido, são apresentados na Figura 6.4.

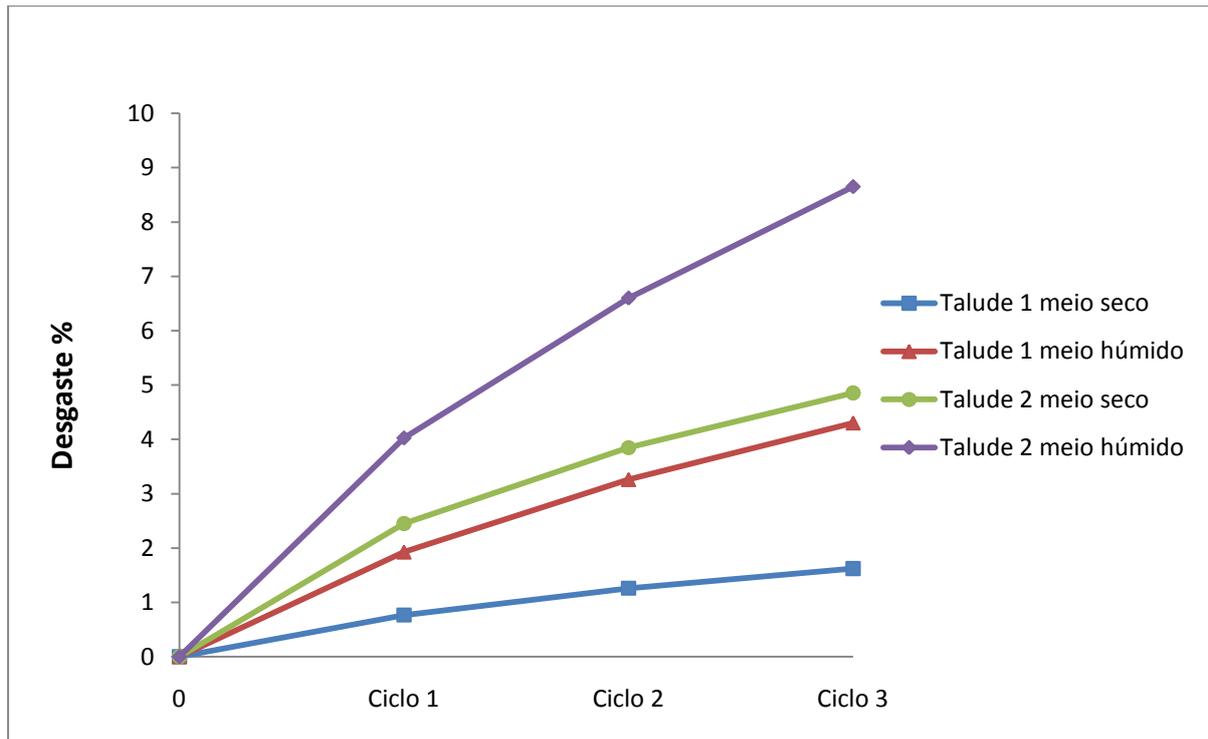


Figura 6.4 – Percentagem de desgaste para os xistos dos 2 taludes

Verificou-se um maior desgaste no 1º ciclo, em relação ao desgaste dos 2º e 3º ciclos. Segundo a classificação de Aufmuth (1974), a classificação para os materiais ensaiados dos 2 taludes em meio seco é, respetivamente, A (alta durabilidade, com menos de 1% de material perdido) e B (durabilidade média, com menos de 3,5% mas com mais de 1% de material perdido); em meio húmido é, respetivamente, B e C (durabilidade baixa, com mais de 3,5% de material perdido).

Segundo a classificação de Gamble (1971), em meio seco, o Talude 1 apresenta um índice de durabilidade, ou percentagem da amostra retida após o ensaio muito alto de 98%-100%, enquanto o Talude 2 apresenta um índice de durabilidade alto de 95%-98%. Em meio húmido, o Talude 1 apresenta um índice de durabilidade alto de 95%-98%, enquanto o Talude 2 apresenta um índice de durabilidade médio alto de 85%-95%.

## 6.5 - Análise comparativa dos resultados dos ensaios aos materiais rochosos

Posteriormente à realização dos ensaios, procurou-se verificar se existiam relações entre os resultados obtidos, para o que se realizaram várias representações gráficas dos resultados, procurando preferencialmente as relações com significado geotécnico. Foram utilizados os valores médios dos taludes de Santarém (2004), para comparar aos 2 taludes.

Consta-se um aumento geral dos valores do peso volúmico com a diminuição da porosidade. Dentro de cada material a relação é mais difusa, mas que a tendência dos materiais individuais sai reforçada com a análise dos três grupos representados.

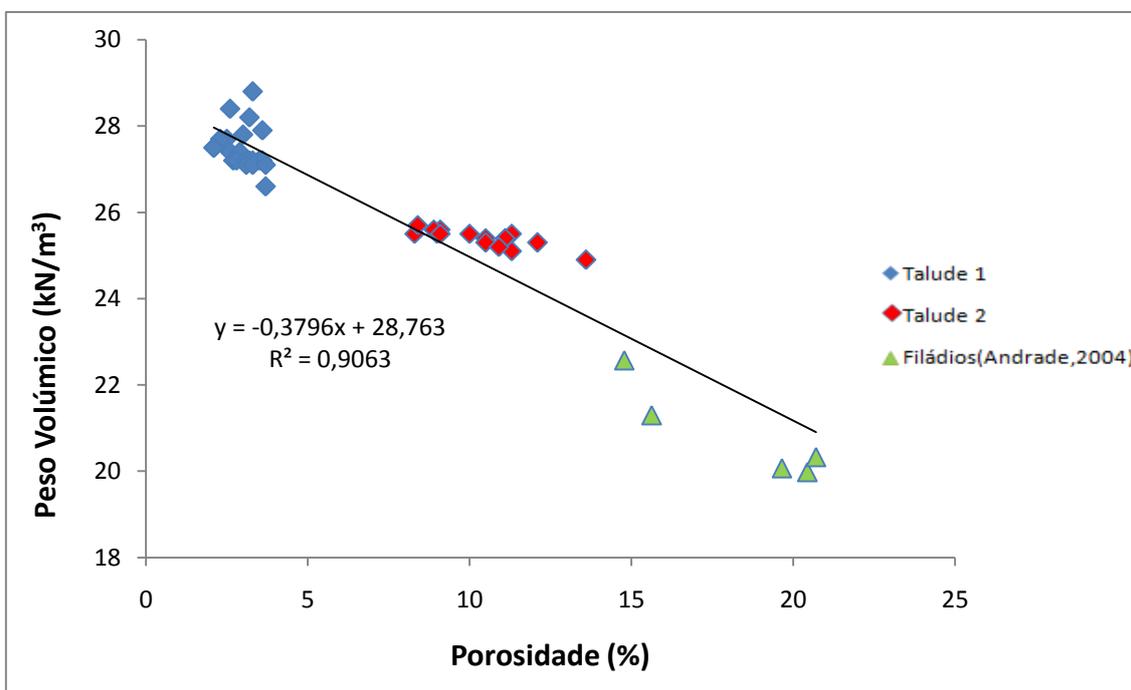


Figura 6.5 – Relação entre a porosidade e o peso volúmico

Na Figura 6.6 verifica-se uma relação direta entre os resultados obtidos do teor em água de saturação e a porosidade.

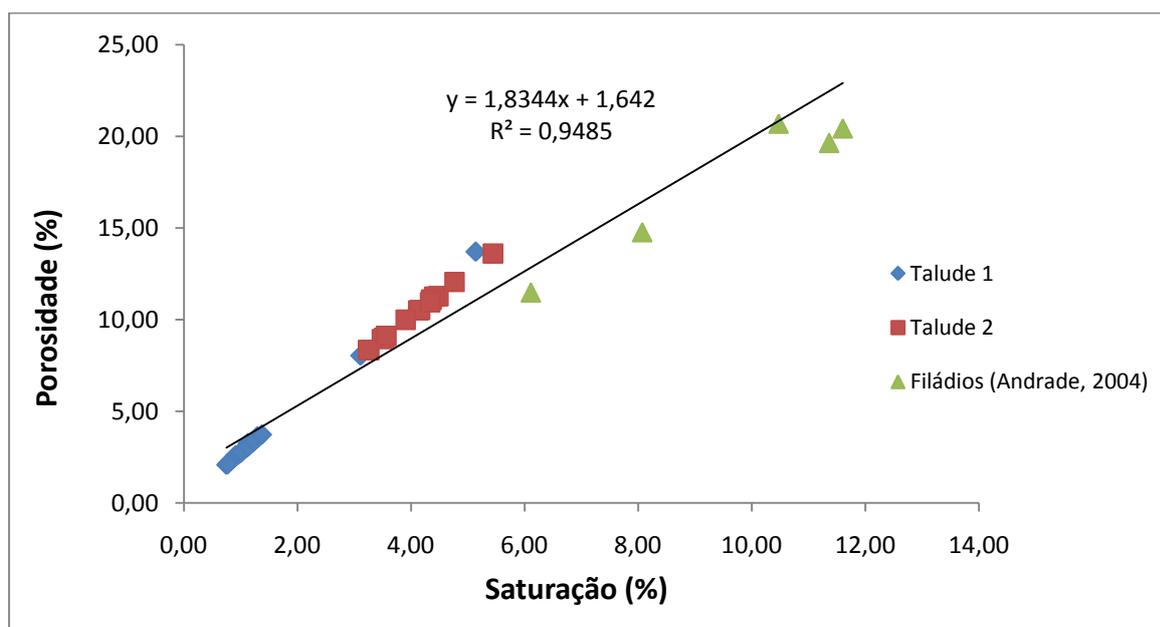


Figura 6.6 – Relação entre os resultados do teor em água de saturação e da porosidade

Na Figura 6.6 verifica-se um aumento geral do teor em água de saturação com o aumento da porosidade, o que está relacionado com o incremento da acessibilidade por parte da água quando existe um aumento da porosidade dos materiais rochosos.

Na Figura 6.7 verifica-se uma relação inversa entre os resultados obtidos do teor em água de saturação e o peso volúmico.

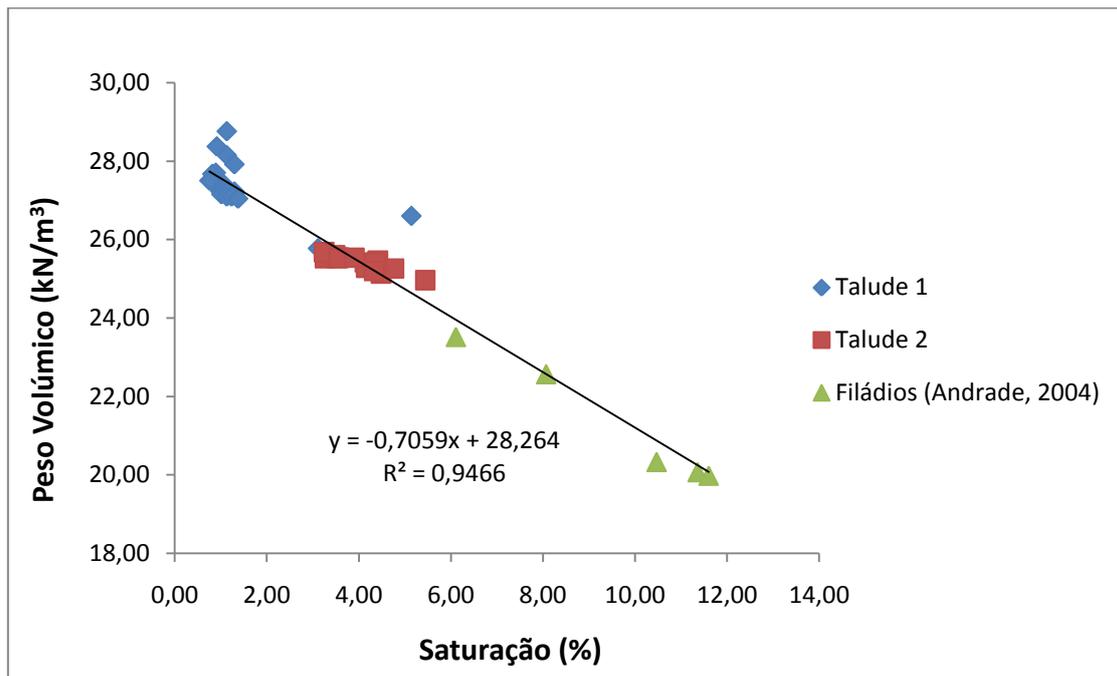


Figura 6.7 – Relação entre os resultados do teor em água de saturação e o peso volúmico

A relação entre o peso volúmico e o teor em água de saturação é uma relação inversa, como se pode observar na Figura 6.7, o que pode ser explicado pela diminuição do peso volúmico quando a fissuração e a porosidade aumentam, o que ocorre nos materiais rochosos mais alterados.

Na Figura 6.8, observa-se a possível relação entre o teor em água de submersão por 24h e teor em água de saturação por vácuo.

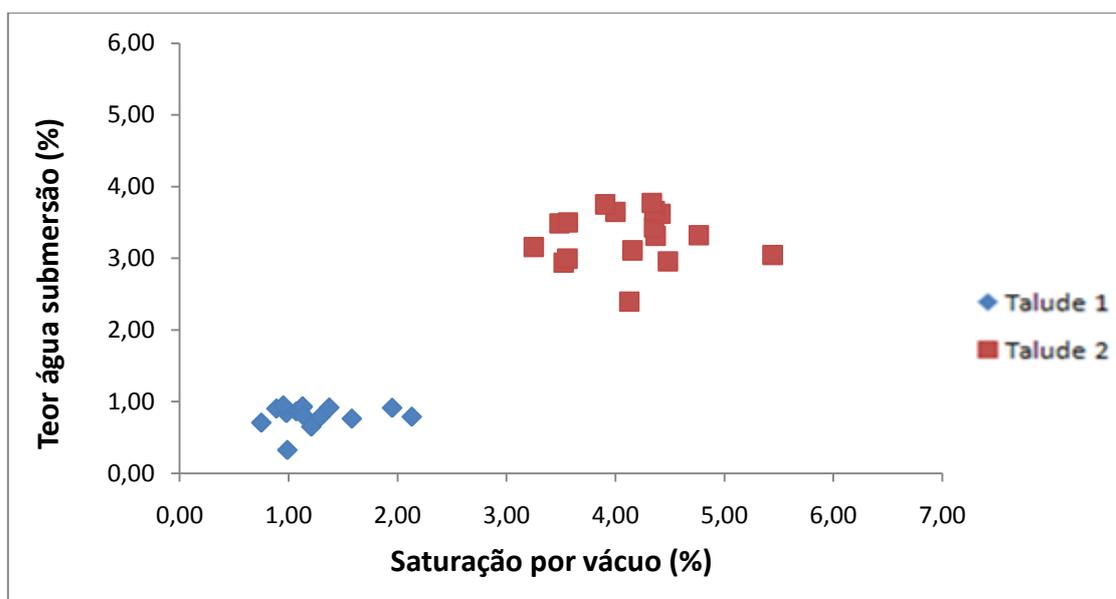


Figura 6.8 – Relação entre teor em água de submersão e teor em água de saturação por vácuo

Verifica-se um aumento da percentagem de absorção pela saturação por vácuo em relação à submersão em água. Os provetes do Talude 2 apresentam maiores índices de absorção devido a uma maior porosidade.

Na Figura 6.9 pode verificar-se uma relação entre os resultados médios obtidos do ensaio de desgaste em meio húmido (2º ciclo) e peso volúmico aparente.

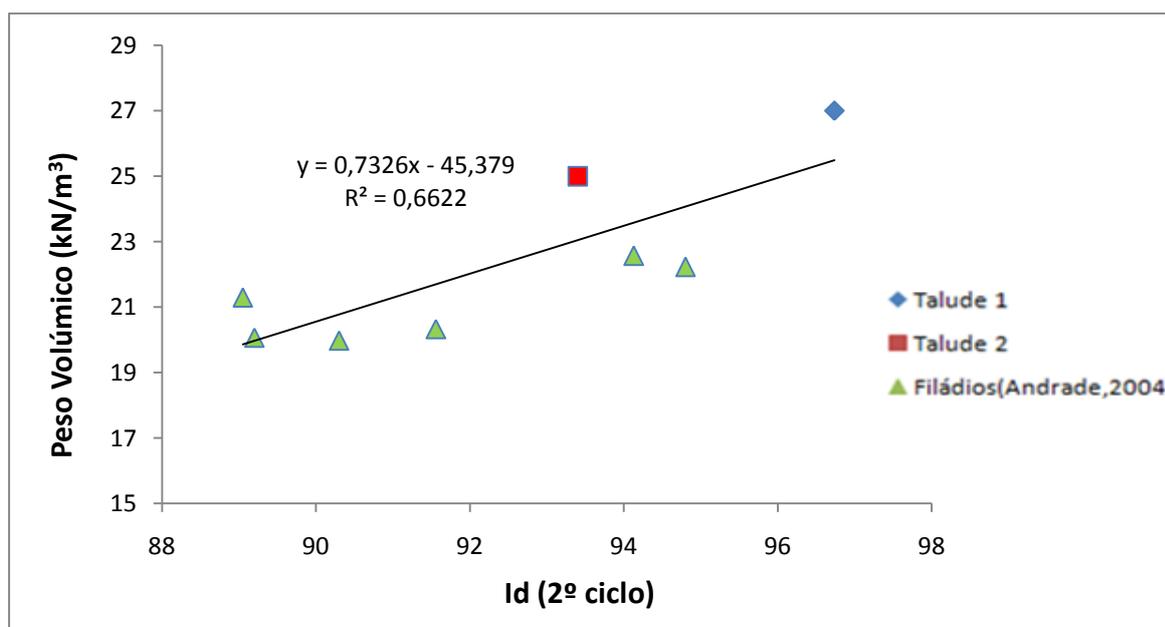


Figura 6.9 – Relação entre o peso volúmico aparente e o índice de durabilidade em meio húmido (2º ciclo)

Constatou-se uma relação positiva entre os índices de durabilidade e os valores do peso volúmico, e uma relação inversa dos primeiros com os valores da porosidade. Na Figura 6.9 verifica-se que os valores mais elevados de resistência ao ensaio de desgaste (2º ciclo) correspondem às amostras com maiores valores de peso volúmico aparente.

Na Figura 6.10 verifica-se a relação entre os resultados médios obtidos do ensaio de desgaste em meio húmido (2º ciclo) e a porosidade.

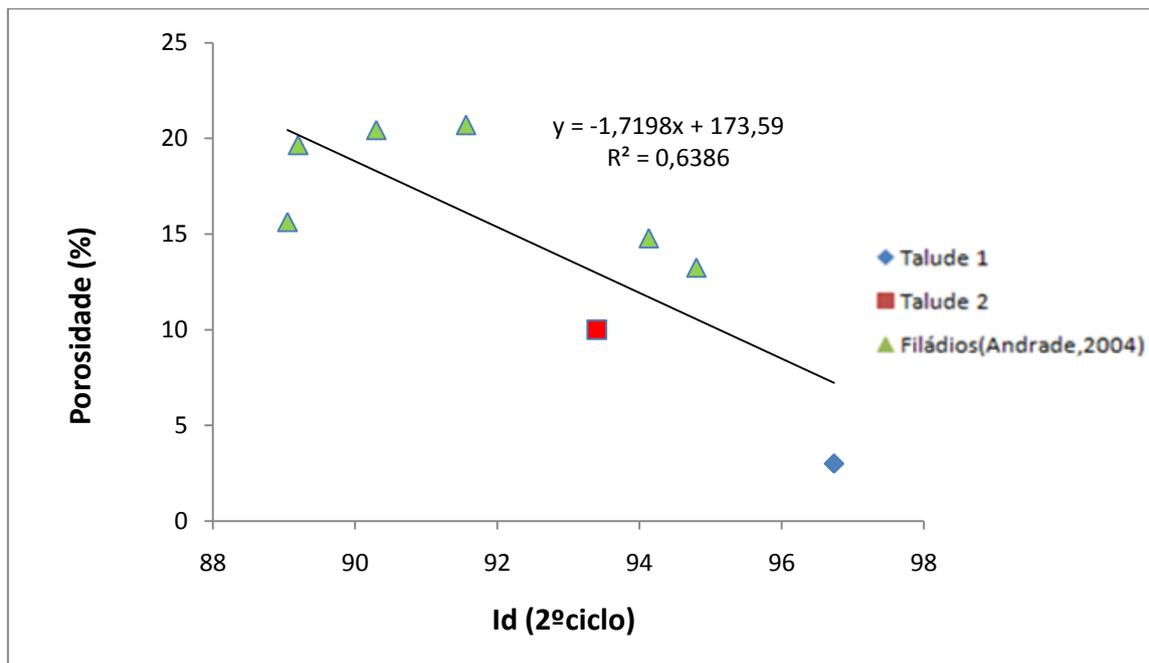


Figura 6.10 – Relação entre a porosidade e o índice de durabilidade em meio húmido (2º ciclo)

Na Figura 6.10 verifica-se que os valores mais elevados de resistência ao ensaio de desgaste (2º ciclo) correspondem às amostras com menor valores de porosidade.

Na Figura 6.11 é possível observar a relação dos resultados médios do peso volúmico aparente e do  $Is_{(50)}$  para provetes secos ao ar.

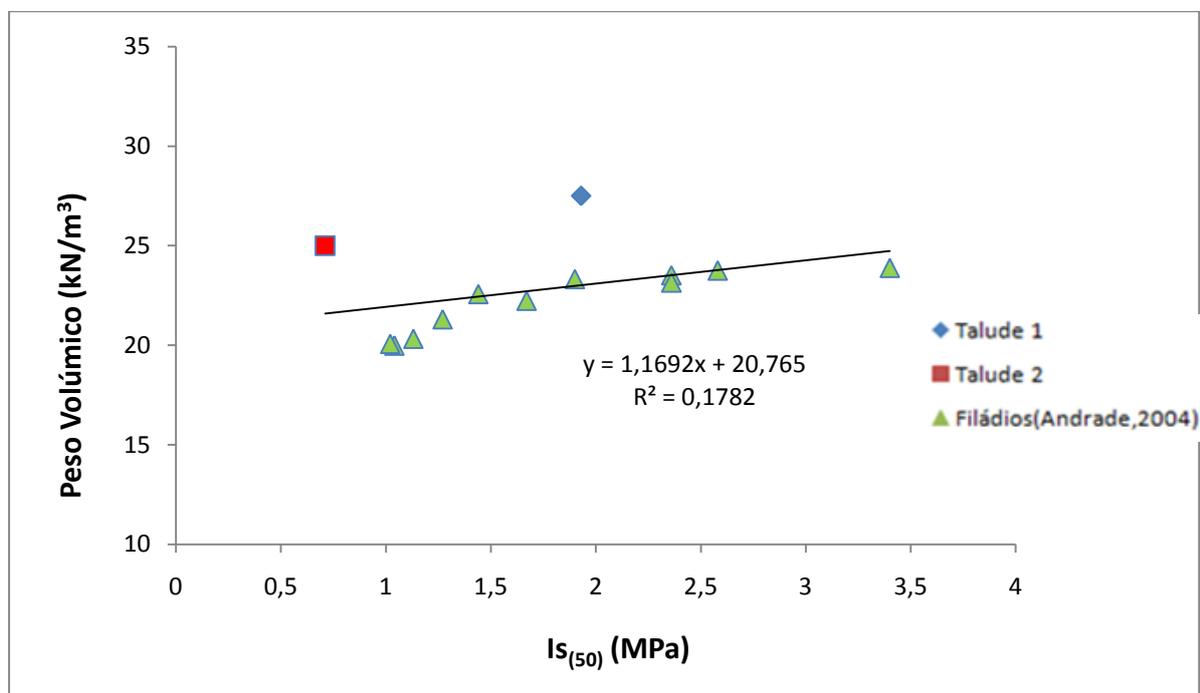


Figura 6.11 – Relação entre o peso volúmico aparente e o  $Is_{(50)}$

Tanto o peso volúmico como a porosidade influenciam os parâmetros de resistência; o  $Is_{(50)}$  aumenta à medida que peso volúmico aparente também aumenta, como se pode comprovar na Figura 6.11. A diminuição da resistência dos xistos para os valores mais reduzidos do peso volúmico aparente está relacionado com o aumento do estado de alteração e consequente incremento da fissuração e da porosidade, o que conduz a uma diminuição acentuada da resistência do material rochoso.

Na Figura 6.12 apresenta-se uma relação entre os resultados médios do teor em água e do  $Is_{(50)}$  para provetes secos ao ar, saturados e completamente secos.

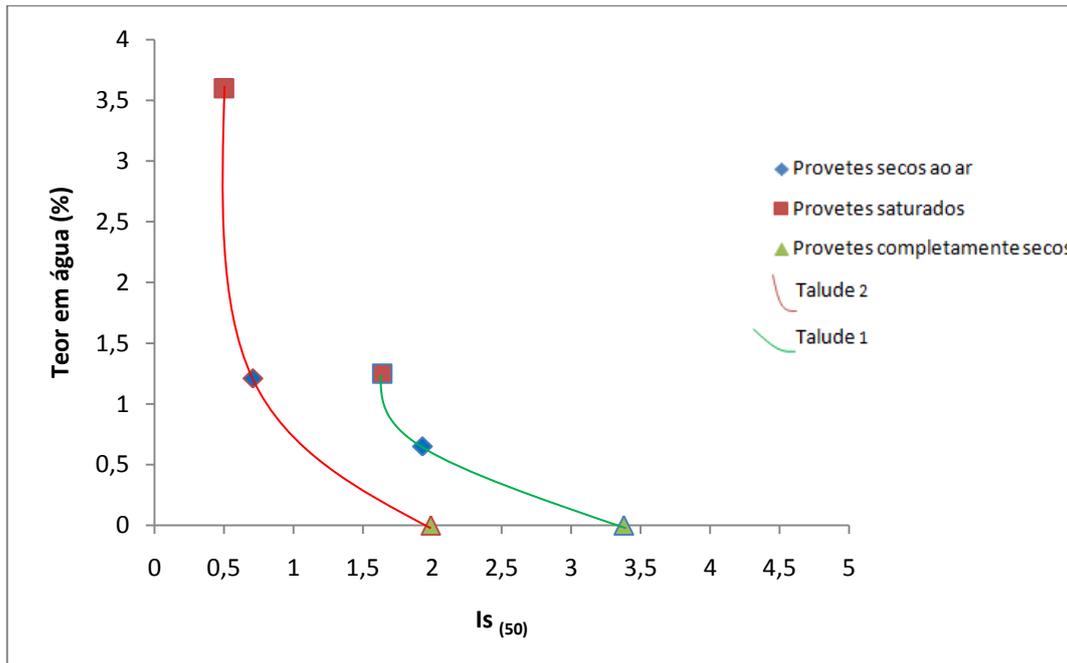


Figura 6.12 – Relação entre o  $Is_{(50)}$  e o teor em água

Na Figura 6.12 constata-se um aumento do  $Is_{(50)}$  com a diminuição do teor em água. Cada talude apresenta uma evolução distinta, mas coerente entre ambos. Será razoável considerar uma faixa de variação entre as linhas apresentadas.







## CAPÍTULO 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho efetuado visou a determinação e comparação da qualidade do material rochoso presente em dois taludes, constituídos essencialmente por xistos, de idade Proterozóica e pertencentes à Série Negra. Para essa determinação foram considerados os valores estimados e calculados através das classificações geomecânicas utilizadas, bem como os resultados obtidos pelos ensaios “*in situ*” e em laboratório.

Através da classificação BGD foi estimado um grau de alteração do maciço de W3 para o Talude 1 e de W4 para o Talude 2, considerando o maciço rochoso do Talude 1 medianamente alterado, enquanto o maciço do Talude 2 apresenta-se muito alterado.

O grau de fracturação estimado para o Talude 1, para a zona A foi F3 e para a zona B, bem como para o Talude 2, foi definido como F4, pelo que o intervalo entre as fraturas do maciço rochoso para o Talude 1, para a zona A, é considerado medianamente afastado; enquanto para a zona B e o Talude 2 apresentam um intervalo entre fraturas classificado como próximo

O valor médio da resistência à compressão uniaxial, obtido através do ensaio do esclerómetro do tipo de Schmidt, para os xistos do Talude 1, foi de 59 MPa para a zona A e 49 MPa para a zona B. Foi um valor ligeiramente superior ao valor médio da resistência à compressão uniaxial obtido através do ensaio de carga pontual, cujo valor foi de 42 MPa. O valor médio obtido através do ensaio de carga pontual para o Talude 2 foi de 16 MPa.

O ângulo médio de atrito das fraturas estimado através do ensaio Tilt foi 27° para ambas as zonas do Talude 1, e 31° para o Talude 2. Tendo em consideração a Tabela 2.8, verifica-se que os taludes apresentam um ângulo de atrito de valor intermédio, correspondente à classe A3.

Através da classificação BGD, pode destacar-se, no estudo de caracterização de ambos os taludes, que o parâmetro relativo ao grau de alteração, permitiu definir uma melhor qualidade ao maciço rochoso do Talude 1.

Para um estudo mais completo dos maciços dos taludes e complementação dos resultados da classificação BGD, procedeu-se à utilização da classificação RMR que compreende vários parâmetros.

O valor calculado do RQD, que é um parâmetro que corresponde a um índice qualitativo do maciço rochoso, em termos de fracturação, e foi definido como igual a 55% para a zona A do Talude 1 e de 56% para a zona B; para o Talude 2 o valor foi de 18%. De

acordo com Deere (1967), a qualidade do maciço rochoso do Talude 1 é razoável, sendo que o do Talude 2 tem uma qualidade muito fraca.

O valor médio do espaçamento das descontinuidades para o Talude 1 foi de 23 cm para a zona A e de 17 cm para a zona B; para o Talude 2 o valor médio foi de 13 cm. Segundo a ISRM (1981) para a zona A do Talude 1 verifica-se que as fraturas podem ser definidas como moderadamente afastadas ou próximas do limite entre as próximas e moderadamente afastadas. As fraturas, tanto na zona B do Talude 1 como no Talude 2, são definidas como próximas.

Para o parâmetro das condições das descontinuidades da Classificação de Bieniawski (1989), atribuiu-se um peso de 14 para a zona A e 18 para a zona B do Talude 1, sendo atribuído um peso de 12 para o Talude 2. Verifica-se que os valores do Talude 1 são mais consistentes com um talude razoável, em comparação com os valores relativos ao Talude 2.

O valor de RMR calculado tendo em conta todos os parâmetros da classificação de Bieniawski (1989), foi 53 e 55 para ambas as zonas do Talude 1, e 36 para o Talude 2, o que demonstra melhor qualidade do maciço rochoso do Talude 1 em relação ao Talude 2, estando em linha com os resultados obtidos da classificação BGD.

Foi calculado um valor do índice GSI, para os 2 taludes, através a expressão 2, de 48 para a zona A, 50 para a zona B do Talude 1, e 31 para o Talude 2. Estimou-se um segundo valor, através da Tabela elaborada por Hoek & Marinos (2000), em que se considerou um intervalo de valores, de 42-52 para ambas as zonas do Talude 1 e 23-33 para o Talude 2. Estes valores foram estimados para o Talude 1, por apresentar características das descontinuidades consideradas razoáveis, sendo moderadamente alteradas e desgastadas, enquanto o Talude 2 apresenta descontinuidades com características fracas, apresentando-se fortemente alteradas.

Através dos resultados estimados para as 3 classificações efetuadas, comprova-se melhor qualidade do material rochoso do Talude 1, comparativamente ao Talude 2. Os valores do GSI são sistematicamente inferiores aos obtidos pelo RMR. Apesar de se tratar de classificações com objetivos parcialmente coincidentes efetuam uma abordagem diferenciada às características dos maciços.

Os valores médios obtidos da massa volúmica aparente, foram de 27,5 MPa para os xistos do Talude 1 e 25,4 MPa para os xistos do Talude 2. Os valores médios obtidos da porosidade, foram de 3% para o Talude 1 e de 10% para o Talude 2. Dos resultados obtidos, como se pode observar na Figura 6.5, constata-se um aumento geral dos valores do peso volúmico aparente com a diminuição da porosidade.

Os valores médios obtidos do ensaio de submersão em 24 horas, foram de 1,1% para os xistos do Talude 1 e 3,4% para os do Talude 2. Para uma submersão de 48 horas, os valores médios obtidos foram de 1,3% para o Talude 1 e 3,6% para o Talude 2. Os valores médios obtidos no ensaio de saturação em vácuo foram de 1,3% para o Talude 1 e 4,1% para o Talude 2. Como se pode observar na Figura 6.6 verifica-se um aumento do teor em água de saturação com o aumento da porosidade, o que está relacionado com o aumento da acessibilidade por parte da água quando existe um incremento da porosidade dos materiais rochosos.

A relação entre o peso volúmico e o teor em água de saturação é uma relação inversa, como se pode observar na Figura 6.7, o que pode ser explicado pela diminuição do peso volúmico quando a fissuração e a porosidade aumentam, o que ocorre nos materiais rochosos mais alterados.

Constatou-se uma relação positiva entre os índices de durabilidade e os valores do peso volúmico, e uma relação inversa dos primeiros com os valores da porosidade. Na Figura 6.9 verifica-se que os valores mais elevados de resistência ao ensaio de desgaste (2º ciclo) correspondem às amostras com maiores valores de peso volúmico aparente. Verifica-se também que os valores mais elevados de resistência ao ensaio de desgaste (2º ciclo) correspondem às amostras com menores valores de porosidade (Figura 6.10).

Tanto o peso volúmico como a porosidade influenciam os parâmetros de resistência. O  $Is_{(50)}$  aumenta à medida que peso volúmico aparente também aumenta, como se pode comprovar na Figura 6.11. A diminuição da resistência dos xistos para os valores mais reduzidos do peso volúmico aparente está relacionado com o aumento do estado de alteração e conseqüente incremento da fissuração e da porosidade, o que conduz a uma diminuição acentuada da resistência do material rochoso.

Constata-se um aumento do  $Is_{(50)}$  com a diminuição do teor em água presente nos xistos. Os xistos de cada um dos taludes apresentam uma evolução diferente, mas coerente entre ambos. Será razoável considerar uma faixa de variação entre as linhas apresentadas.

Verifica-se através dos ensaios de identificação mineralógica, que a mineralogia condiciona igualmente as propriedades de resistência e de durabilidade. A análise dos difractogramas de raios X possibilitou a identificação de maior quantidade de minerais argilosos como a illite e a caulinite, para o material rochoso do Talude 2 (Figura 6.2), o que pode estar relacionado com um maior estado de alteração verificado no Talude 2. O Talude 1 apresenta valores mais elevados no ensaio de resistência à carga pontual, e

consequentemente maiores valores de resistência à compressão uniaxial, que estão possivelmente relacionados com a presença de minerais mais resistentes como o quartzo ou a pirite e com o estado de alteração.

Em trabalhos a desenvolver posteriormente deverão aplicar-se as classificações estudadas, a um maior número de taludes rochosos, bem como introduzir-se novos parâmetros ou modificações nas classificações geomecânicas apresentadas, de modo a confirmar os resultados ou proceder a ajustamentos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, P.S. (2004) – “Caracterização geomecânica e análise da estabilidade em maciços rochosos anisotrópicos”, tese de Doutorado apresentada na Universidade de Coimbra, pp. 147-168

Andrade, P.S. (2008) – “Estudo das principais características das descontinuidades”. Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 43 pp.

Aufmuth, R.E. (1974) – “Site engineering index of rock”. ASTM Spec. Tech. Publ., 554, pp. 81-99

Bienawski, Z. T. (1979). “The geomechanics classification in rock engineering applications”. Proc. 4 th Int. Conference on Rock Mechanics. Montreaux. Balkema, vol. 2, pp. 41-48.

Bieniawski, Z. T. (1989). “Engineering rock mass classifications”. John Wiley and Sons.

CEN prEN 1936 (1997) – “Methods of test for natural stone units – determination of real density and apparent density, and of total and open porosity”.

Deere, D. U.(1967) – Geological considerations. “Rock Mechanics in Engineering Practice”, 1<sup>st</sup> chapter, Stagg & Zienkiewicz, London.

Deere. D. U. (1964) – Technical description of cores for engineering purposes. “Rock Mechanics and Engineering Geology, pp. 18-22.

Deere. D. U.; Miller, R.P. (1966) – “Engineering classification and index properties for intact rock”. Technical Report AFWL-TR-65-116. Air Force Weapons Lab., Kirtland Air Force Base, New Mexico.

Franklin, J.A.; Chandra, R. (1972) – “The slake durability test” – Int. J. Rock Mechanics and Mining Science, vol. 9., pp. 325-341.

Gamble, J.C. (1971) – “Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks” – Ph.D, Thesis. University of Illinois, Urbana.

Hoek, E. (1994) – “Strength of rock and rock masses”. ISRM New Journal 2 (2), pp. 4-16.

Hoek, E. (2007). “Practical Rock Engineering” - [http://www.rocscience.com/hoek/pdf/Practical\\_Rock\\_Engineering.pdf](http://www.rocscience.com/hoek/pdf/Practical_Rock_Engineering.pdf), acedido a 7 de Maio de 2014, pp. 1-12

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

Hoek, E.; Brown, E. T. (1997) - “Practical estimates of and rock mass strength”. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Elsevier, vol. 34, nº8, pp. 1165-1186.

Hudson, J.A.; Harrison, J.P. (1997) – “Engineering rock mechanics - An introduction to the principles” – Elsevier Science. Pergamom. Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, UK, pp. 193 – 195.

IAEG (1979) – “Classification of rocks and soils for engineering geological mapping”, Part 1 – rock and soils materials. Bulletin of the International Association Engineering Geology, 19, pp. 240-244; pp. 364 – 371.

ISO 14689-1 (2003) – “Geotechnical investigation and testing — Identification and classification of rock” – First Edition, Part 1: Identification and description, pp. 4-12.

ISRM (1978) – “Suggested Method For Determination Of The Schmidt Rebound Hardness” - Int. J. Rock Mechanics and Mining Science and Geomech, Vol. 15, No 3, pp 89-97.

ISRM (1978) – “Suggested Method For quantitative description of discontinuities in rock masses” - Int. J. Rock Mechanics and Mining Science and Geomech, Vol. 15, No 3, pp 219 - 368.

ISRM (1981) – “Basic geotechnical description of rock masses” – Int. J. Rock Mechanics and Mining Science and Geomech., Vol. 18, pp. 51-60.

ISRM (1985) - “Suggested method for determination point load strength” – Int. J. Rock Mechanics and Mining Science and Geomech., vol. 22 (2), pp. 51 – 60.

Lima, C.; Menezes, J.E. (2008) - *Textos de apoio de Geologia de Engenharia*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Marinos, P.; Hoek, E. (2000). “Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysch”. Submitted for publication in Bull. Engg. Geol. Env

NP EN 1097-2 (2002) – “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados”. Normas Portuguesas.

Perdigão, R. (2014) – “Estudo dos xistos alterados em 2 taludes da Série Negra na zona de Coimbra”, tese de Mestrado apresentada na Universidade de Coimbra

Ramamurthy, T. (2010) - “Engineering in Rocks for Slopes, Foundations and Tunnels” – Second Edition, pp. 144 – 152.

Santi, P. M. (1998) - “Improving the Jar slake, slake index and slake durability tests for shales”. Environmental & Engineering Geoscience. Vol. IV (3), pp. 385-396.

SCE (2002) – “Carta Militar de Portugal, nº 241, de Coimbra Sul, escala 1/25000”. Serviço Cartográfico do Exército, Lisboa.

Schmidt, E. (1951) – “A non-destructive concrete tester”. Concrete, 59 (8), pp. 34-36.

Soares, A. F.; Marques, J. F.; Sequeira, A. J. D. (2007) - *Notícia Explicativa da Folha 19-D (Coimbra-Lousã)*. Lisboa: Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, pp. 7 – 10.

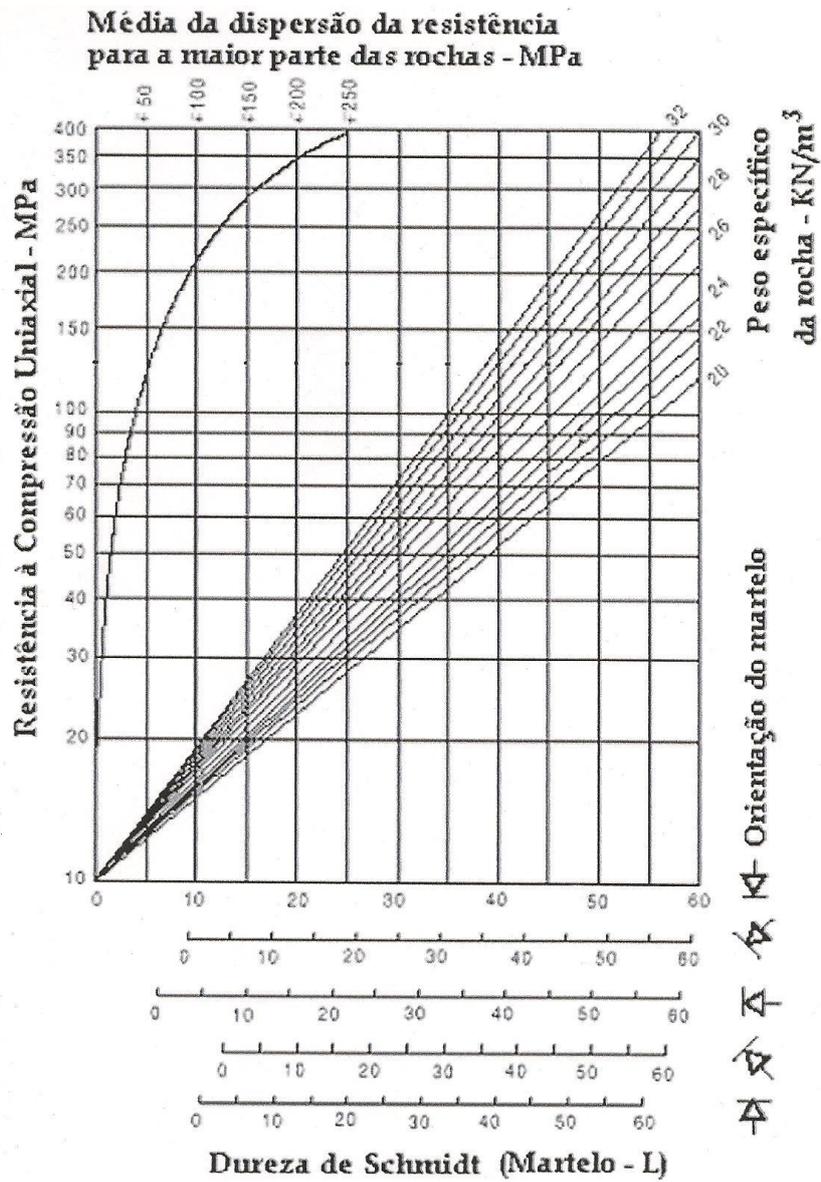
Tavares, A. (1999) – “Condicionantes físicas ao planeamento – Análise da susceptibilidade no espaço do concelho de Coimbra”, Tese de Doutoramento apresentada na Universidade de Coimbra

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

Yagiz, S.; Cheema, S. (1998-2000) – “Review And Comparison Of Rock Mass Classification Systems”. Proceedings of the 68th Annual Session Pakistan Engineering Congress, vol. 68, Pakistan.

## **ANEXOS**

**ANEXO I - Ábaco para estimativa da resistência à compressão a partir da dureza de Schmidt (Hoek, 2007)**



**ANEXO II - Parâmetros das condições das discontinuidades para a Zona A do 1º talude, segundo a Classificação BGD e RMR**

Talude 1 - Zona A							
Famílias	Orientação Famílias	Espaçamento (cm)	Continuidade (m)	Abertura (mm)	Rugosidade (0-6)*	Enchimento (0-6)*	Alteração (0-6)*
T1	N35ºE, 32ºSE	24	1	0,1-1	3	5	3
T2	N55ºE, 35ºSE	23	1	1 - 5	3	5	3
T3	N55ºE, 35ºSE	29	1	1 - 5	3	5	3
T4	N50ºE, 35ºSE	28	1	1 - 5	3	5	3
T5	N52ºE, 35ºSE	30	1	1 - 5	3	5	3
T6	N57ºE, 33ºSE	35	1	1 - 5	3	5	3
T7	N55ºE, 31ºSE	27	1	1 - 5	3	5	3
T8	N53ºE, 35ºSE		1	1 - 5	3	5	3
<b>Média T</b>	<b>N50ºE, 35ºSE</b>	<b>28</b>	<b>1</b>	<b>1 - 5</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>3</b>
Xistosidade 1	N-S, 60ºE	28	2	1 - 5	1	5	3
Xistosidade 2	N-S, 60ºE	26	2	1 - 5	1	5	3
Xistosidade 3	N-S, 60ºE	24	2	1 - 5	1	5	2
Xistosidade 4	N-S, 52ºE	32	2	1 - 5	2	2	2
Xistosidade 5	N-S, 50ºE	18	2	1 - 5	2	2	2
Xistosidade 6	N-S, 58ºE	25	2	1 - 5	1	2	2
Xistosidade 7	N-S, 58ºE	24	2	1 - 5	1	2	2
Xistosidade 8	N-S, 58ºE	26	2	1 - 5	1	2	2
Xistosidade 9	N-S, 58ºE	22	2	1 - 5	2	2	2
Xistosidade 10	N-S, 58ºE		2	1 - 5	2	2	2
<b>Média Xistosidade</b>	<b>N-S, 56ºE</b>	<b>23</b>	<b>2</b>	<b>1 - 5</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>2</b>
F1	N60ºE, 80ºSE	23	1	1 - 5	2	5	3
F2	N50ºE, 50ºSE	20	1	1 - 5	2	5	3
F3	N50ºE, 50ºSE	20	1	1 - 5	2	5	3
F4	N60ºE, 54ºSE	20	1	1 - 5	2	5	3
F5	N55ºE, 58ºSE	23	1	1 - 5	2	5	3
F6	N50ºE, 52SE	20	1	1 - 5	2	5	3
F7	N55ºE, 57ºSE		1	1 - 5	2	5	3
<b>Média F</b>	<b>N53ºE, 57ºSE</b>	<b>21</b>	<b>1</b>	<b>1 - 5</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>3</b>
E1	N30ºW, 50ºSW	3	1	1 - 5	3	5	3
E2	N40ºW, 48ºSW	3	1	1 - 5	3	5	3
E3	N40ºW, 50ºSW	3	1	1 - 5	3	5	3
E4	N40ºW, 47ºSW	3	1	1 - 5	3	5	3
E5	N40ºW, 53ºSW	3	1	1 - 5	3	5	3
E6	N40ºW, 48ºSW		1	1 - 5	3	5	3
<b>Média E</b>	<b>Nº38ºW, 48ºSW</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1 - 5</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>3</b>

\* Valores dos pesos, adaptado da Classificação geomecânica de Bieniawski (1989) (Tabela 2.9)

**ANEXO III - Parâmetros das condições das descontinuidades para a Zona B do 1º talude, segundo a Classificação BGD e RMR**

Talude 1 - Zona B							
Famílias	Orientação Famílias	Espaçamento (cm)	Continuidade (m)	Abertura (mm)	Rugosidade (0-6)*	Enchimento (0-6)*	Alteração (0-6)*
Xistosidade 1	N-S, 50ºE	20	3	0,1 – 1,0	3	5	3
Xistosidade 2	N-S, 44ºE	16	3	0,1 – 1,0	3	5	3
Xistosidade 3	N10ºE, 50ºE	22	3	0,1 – 1,0	1	5	3
Xistosidade 4	N10ºE, 50ºE	17	3	0,1 – 1,0	1	5	2
Xistosidade 5	N10ºE, 50ºE	21	3	0,1 – 1,0	1	2	2
Xistosidade 6	N10ºE, 50ºE	22	3	0,1 – 1,0	3	2	2
Xistosidade 7	N10ºE, 50ºE	22	3	0,1 – 1,0	3	2	2
Xistosidade 8	N10ºE, 50ºE		3	0,1 – 1,0	1	2	2
Média Xistosidade	N8ºE, 48ºE	18	3	0,1 – 1,0	2	4	2
F1	N85ºW, 85ºS	9	1	0,1 – 1,0	3	5	3
F2	N85ºW, 85ºS	14	1	0,1 – 1,0	3	5	3
F3	N85ºW, 85ºS	24	1	0,1 – 1,0	3	2	3
F4	N85ºW, 85ºS	8	1	0,1 – 1,0	3	5	3
F5	N85ºW, 85ºS	15	1	0,1 – 1,0	3	5	3
F6	N85ºW, 85ºS	17	1	0,1 – 1,0	3	2	3
F7	N85ºW, 85ºS		1	0,1 – 1,0	3	2	3
Média F	N85º, 85ºS	12	1	0,1 – 1,0	3	4	3
T1	N30ºE, 40NW	16	1	0,1 – 1,0	4	3	3
T2	N30ºE, 45NW	21	1	0,1 – 1,0	4	3	3
T3	N30ºE, 42NW	25	1	0,1 – 1,0	4	3	3
T4	N30ºE, 49NW	13	1	0,1 – 1,0	4	3	3
T5	N30ºE, 46NW	12	1	0,1 – 1,0	4	3	2
T6	N30ºE, 45NW	15	1	0,1 – 1,0	4	3	3
T7	N30ºE, 41NW	17	1	0,1 – 1,0	4	3	2
T8	N30ºE, 40NW		1	0,1 – 1,0	4	3	3
Média T	N30ºE, 44NW	15	1	0,1 – 1,0	4	3	3

\* Valores dos pesos, adaptado da Classificação geomecânica de Bieniawski (1989) (Tabela 2.9)

**ANEXO IV - Parâmetros das condições das descontinuidades para o 2º talude, segundo a Classificação BGD e RMR**

Talude 2							
Famílias	Orientação Famílias	Espaçamentos (cm)	Continuidade (m)	Abertura (mm)	Rugosidade (0-6)*	Enchimento (0-6)*	Alteração (0-6)*
Xistosidade 1	N25ºE, 66ºW	4	10	0,1	3	2	1
Xistosidade 2	N25ºE, 70ºW	5	10	0,5	2	2	1
Xistosidade 3	N25ºE, 68ºW	4	10	0,5	3	2	1
Xistosidade 4	N25ºE, 62ºW	8	10	1 - 5	3	2	1
Xistosidade 5	N25ºE, 70ºW	8	10	1 - 5	3	2	1
Xistosidade 6	N25ºE, 67ºW	5	10	1 - 5	2	2	1
Xistosidade 7	N25ºE, 72ºW	9	10	1 - 5	2	2	1
Xistosidade 8	N25ºE, 74ºW		10	0,5	2	2	1
Média Xistosidade	N29ºE, 69ºW	5	10	1 - 5	3	2	1
S1	E-W, Subvertical	40	1,2	1 - 5	5	3	3
S2	E-W, 60ºS	22	1,2	1 - 5	5	2	1
S3	E-W, 70ºS	18	1,2	1 - 5	5	2	2
S4	E-W, Subvertical	15	1,2	1 - 5	5	3	1
S5	E-W, 80ºS	17	1,2	1 - 5	5	4	2
S6	E-W, 65ºS	20	1,2	1 - 5	5	4	1
S7	E-W, 68º		1,2	1 - 5	5	2	1
Média S	E-W, 67ºS	19	1,2	1 - 5	5	3	2
F1	Nº40ºE, 25ºSE	16	1	1 - 5	3	2	3
F2	Nº25ºE, 21ºSE	14	1	1 - 5	3	4	1
F3	Nº28ºE, 20ºSE	8	1	1 - 5	3	4	2
F4	Nº40ºE, 25ºSE	12	1	1 - 5	3	3	1
F5	Nº25ºE, 21ºSE	5	1	1 - 5	3	3	1
F6	Nº28ºE, 20ºSE	22	1	1 - 5	3	3	2
F7	Nº40ºE, 25ºSE		1	1 - 5	3	2	1
Média F	Nº32ºE, 22ºSE	11	1	1 - 5	3	3	2

\* Valores dos pesos, adaptado da Classificação geomecânica de Bieniawski (1989) (Tabela 2.9)

**ANEXO V – Valores de dureza R obtidos através do esclerómetro do tipo de Schmidt e valores correlacionados da Resistência à Compressão Uniaxial**

<b>Talude 1</b>											
<b>Zona A</b>						<b>Zona B</b>					
<b>1ª Medição</b>		<b>2ª Medição</b>		<b>3ª Medição</b>		<b>4ª Medição</b>		<b>5ª Medição</b>		<b>6ª Medição</b>	
<b>Dureza R</b>	<b>Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)</b>	<b>Dureza R</b>	<b>Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)</b>	<b>Dureza R</b>	<b>Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)</b>	<b>Dureza R</b>	<b>Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)</b>	<b>Dureza R</b>	<b>Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)</b>	<b>Dureza R</b>	<b>Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)</b>
38	100	19	41	34	80	28	62	15	32	15	32
17	38	18	40	28	62	27	57	18	40	24	50
26	55	20	42	31	68	24	50	17	38	22	45
30	67	22	45	32	71	22	45	14	31	20	42
28	62	18	40	31	68	28	62	15	32	34	80
36	88	28	62	29	63	32	71	18	40	28	62
40	105	20	42	30	67	33	75	19	41	28	62
18	40	23	48	29	63	24	50	16	39	26	55
33	75	22	45	30	67	23	47	13	30	28	62
30	67	27	57	32	71	31	68	13	30	22	45
<b>Média</b>	<b>29,6</b>	<b>21,7</b>	<b>46,2</b>	<b>30,6</b>	<b>68</b>	<b>27,2</b>	<b>58,7</b>	<b>15,8</b>	<b>35,3</b>	<b>24,7</b>	<b>53,5</b>
<b>Desvio Padrão (%)</b>	<b>7,4</b>	<b>3,3</b>	<b>7,2</b>	<b>1,7</b>	<b>5,0</b>	<b>3,7</b>	<b>10,0</b>	<b>2,0</b>	<b>4,4</b>	<b>5,0</b>	<b>12,9</b>

**ANEXO VI – Valores da massa volúmica aparente e da porosidade para os 2 taludes**

Talude 1						Talude 2					
Amostra	Peso seco	Peso saturado	Peso submerso	Massa volúmica aparente (kN/m <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	Amostra	Peso seco	Peso saturado	Peso submerso	Massa Volúmica Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	Porosidade (%)
1	232,9	235,52	152,97	28,2	3,2	1	316,92	330	205,57	25,4	10,5
2	274,65	277,09	178,16	27,7	2,5	2	137,33	142,17	88,48	25,5	9
3	122,43	123,78	78,8	27,2	3	3	351,41	367,16	227,61	25,1	11,3
4	172,85	174,8	114,83	28,8	3,3	4	156,78	162,36	101,12	25,6	9,1
5	114,43	115,91	75,01	27,9	3,6	5	180,43	190,25	118,12	24,9	13,6
6	129,52	130,7	85,15	28,4	2,6	6	69,78	72,68	45,13	25,3	10,5
7	132,5	133,58	85,8	27,7	2,3	7	257,9	266,31	165,48	25,5	8,3
8	83,58	86,18	53,82	27,8	3	8	176,3	184,7	115,05	25,3	12,1
			<b>Média</b>	<b>27,9</b>	<b>2,9</b>				<b>Média</b>	<b>25,3</b>	<b>10,6</b>
			<b>Desvio Padrão (%)</b>	<b>0,49</b>	<b>0,44</b>				<b>Desvio Padrão (%)</b>	<b>0,23</b>	<b>1,77</b>
9	93,53	94,42	60,36	27,4	2,6	9	229,14	239,12	149,01	25,4	11,1
10	180,9	190,2	122,34	26,6	3,7	10	298,81	309,23	192,76	25,6	8,9
11	130,06	131,06	83,88	27,5	2,1	11	135,53	141,51	88,4	25,5	11,3
12	130,42	131,4	84,08	27,5	2,1	12	116,47	120,25	74,99	25,7	8,4
13	138,48	140,27	89,51	27,2	3,5	13	270,91	282,72	176,3	25,4	11,1
14	122,17	123,12	78,78	27,5	2,1	14	92,87	96,18	59,88	25,5	9,1
15	102,61	103,85	66,25	27,2	3,3	15	99,08	102,95	64,23	25,5	10
16	171,87	173,71	111,11	27,4	2,9	16	195,68	204,16	126,66	25,2	10,9
			<b>Média</b>	<b>27,3</b>	<b>2,8</b>				<b>Média</b>	<b>25,5</b>	<b>10,1</b>
			<b>Desvio Padrão (%)</b>	<b>0,30</b>	<b>0,66</b>				<b>Desvio Padrão (%)</b>	<b>0,15</b>	<b>1,16</b>

