



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

CARATERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DOS CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS DAS CAMADAS DE COIMBRA

Rafael Luís dos Santos Faim

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 CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS DAS CAMADAS DE COIMBRA

Rafael Luís dos Santos Faim

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

Orientadores científicos

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

Prof. Doutor Fernando Pedro Ortega de Oliveira Figueiredo
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.

Ao Professor Doutor Pedro Gomes Cabral Santarém Andrade e Professor Doutor Fernando Pedro Ortega de Oliveira Figueiredo, um agradecimento pela orientação, pela disponibilidade permanente e pelas sugestões dadas ao longo deste trabalho e dos anos de curso.

Ao Sr. João Moura, funcionário do departamento Ciências da Terra, pela disponibilidade e ajuda prestada no transporte das Sondagens para o Laboratório de Geotecnia, e na instalação de alguns equipamentos necessários para a realização dos ensaios laboratoriais.

Um agradecimento sincero e especial aos meus amigos e colegas de curso, pela amizade, companheirismo e apoio ao longo destes anos.

À minha Mãe, pelo apoio que me deu durante toda a minha vida, mas sobretudo pelos sacrifícios que fez, que permitiu que concluísse esta etapa do meu percurso académico.

A todos, o meu mais profundo e sincero **MUITO OBRIGADO!**

RESUMO

Este trabalho teve como principal objetivo a caracterização física e mecânica dos calcários dolomíticos, com diferentes estados de alteração, das Camadas de Coimbra. Neste contexto, avaliaram-se as principais propriedades geotécnicas de um conjunto de provetes (mais de oitenta), obtidos a partir de uma campanha de sondagens realizada na Alta da Cidade de Coimbra, e que foram posteriormente submetidos aos ensaios de laboratório.

O trabalho inicia-se por uma caracterização das propriedades geotécnicas das rochas intactas avaliadas nesta investigação, passando pelo enquadramento geológico da formação amostrada.

Em seguida apresentam-se as metodologias adotadas na realização dos sete ensaios em laboratório para a determinação das propriedades do material do maciço rochoso. Na realização dos ensaios começou-se em primeiro pelos ensaios considerados não destrutivos e só depois se realizaram os destrutivos. Foram determinadas várias características tais como a resistência à compressão uniaxial, velocidades de propagação das ondas sísmicas e a porosidade.

Para classificar o maciço rochoso onde se efetuaram as sondagens, foi utilizada a classificação geomecânica *Rock Mass Rating* (RMR) de Bieniawski (1989), onde são analisados vários parâmetros tais como a resistência do material rochoso, o *Rock Quality Designation* (RQD), o espaçamento, as condições das descontinuidades e a presença da água.

Discutem-se os resultados obtidos em laboratório, incluindo correlações entre algumas daquelas propriedades.

Sintetizaram-se as principais conclusões obtidas, tecem-se considerações sobre a validade dos resultados.

Palavras-chave: Caracterização geotécnica, propriedades geotécnicas, calcários, ensaios laboratoriais.

ABSTRACT

The main purpose of this study was to carry out the physical and mechanical characterization of dolomitic limestones, with different degrees of weathering, and belonging to the Camadas de Coimbra Formation. In this context, the main geotechnical properties of more than 80 specimens obtained during a drilling campaign in the high part of the city of Coimbra were assessed. These specimens were later submitted to laboratory tests.

The study begins with a characterization of the geotechnical properties of the intact stones used in this research, as well as a description of their geological framework.

The methodologies adopted during the seven tests carried out in laboratories to determine the solid rocks properties are then presented. First the non-destructive tests were analyzed and then the destructive ones. Different characteristics were analyzed: the uniaxial compression strength, the velocity of propagation of seismic waves and porosity.

To classify the rock mass where surveys were carried out, the geomechanical classification Rock Mass Rating (RMR) system of Bieniawski (1989) was used. In the RMR several parameters are analyzed, such as the rock material strength, the Rock Quality Designation (RQD), the spacing, discontinuity conditions and the presence of water.

The results obtained in laboratory are then discussed, including correlations between some of those properties.

To conclude, the main conclusions are summarized and some considerations are made about the validity of the results.

Keywords: *Geotechnical characterization, geotechnical properties, limestones, laboratory tests.*

ÍNDICE

Agradecimentos	I
Resumo	II
<i>Abstract</i>	III
Índice	IV
Índice de Figuras	VII
Índice de Tabelas	X
1. Introdução	1
1.1. Organização do trabalho	2
2. Enquadramento geográfico e geológico	3
2.1. Enquadramento geográfico	3
2.2. Enquadramento geológico regional	3
2.3. Enquadramento geológico local	6
3. Ensaaios em laboratório	8
3.1. Ensaio de velocidades de ondas de ultra-sons	8
3.2. Determinação da massa volúmica aparente e porosidade aberta	12
3.3. Determinação da dureza de Schmidt	14
3.4. Ensaio de resistência à carga pontual (" <i>point load Strength</i> ")	17
3.5. Ensaio de desgaste em meio húmido	23
3.5.1. Metodologia	24
3.6. Ensaio de resistência à compressão uniaxial	26
3.7. Ensaio de Módulo de Elasticidade	27
3.7.1. Módulo de elasticidade dinâmico	27
3.7.2. Módulo de elasticidade estático	28
4. Classificação Geomecânica <i>Rock Mass Rating</i>	30
4.1. Resistência do material rochoso	33
4.2. <i>Rock Quality Designation (RQD)</i>	33

4.3. Espaçamento das descontinuidades	34
4.4. Condições das descontinuidades	35
4.5. Presença de água	40
4.6. Orientação das descontinuidades	40
5. Resultados dos ensaios laboratoriais.....	42
5.1. Amostragem e preparação dos provetes.....	42
5.1.1. Ensaio de velocidade de propagação das ondas sísmicas (ultra-sons) .	43
5.1.2. Determinação da massa volúmica aparente e porosidade aberta	44
5.1.3. Determinação da dureza de Schmidt.....	45
5.1.4. Ensaio de resistência à carga pontual (“ <i>point load Strength</i> ”).....	46
5.1.5. Ensaio de desgaste em meio húmido.....	47
5.1.6. Resistência à compressão uniaxial.....	48
5.1.7. Ensaio do Módulo de elasticidade	51
5.2. Classificação RMR de Bieniawski	57
6. Discussão de resultados.....	59
7. Conclusões	72
7.1. Considerações finais	72
7.2. Possíveis trabalhos futuros	75
Referencias Bibliográficas.....	76
ANEXO I – Resultados dos ensaios da velocidade de propagação das ondas longitudinais e transversais.	80
ANEXO II – Resultados dos ensaios de módulo de Elasticidade dinâmico.....	82
ANEXO III - Resultado da classificação RMR para a sondagem 3 no Laboratório Chimico.....	83
ANEXO IV - Resultado da classificação RMR para a sondagem 1 no Colégio da Trindade.....	84
ANEXO V - Resultado da classificação RMR para a sondagem 2 no Colégio da Trindade.....	85

ANEXO VI - Resultado da classificação RMR para a sondagem 4 na Faculdade de Farmácia.....	86
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – A) Mapa de Portugal continental; B) Localização da área em estudo a partir do <i>Google Earth</i> (2014).....	3
Figura 2.2 A - Extrato da carta geológica de Coimbra Norte (Adaptado de Soares <i>et al.</i> (1985)). O local de estudo encontra-se assinalado com um círculo de cor vermelha.	4
Figura 3.1 - Esquema ilustrativo do ajuste de um transdutor em superfícies com diferentes graus de rugosidade.	9
Figura 3.2 - Esquema do acoplante entre as faces do transdutor e da amostra (NDT, n.d.).....	10
Figura 3.3 – Ensaio de massa volúmica aparente e porosidade aberta.	13
Figura 3.4 – Esclerómetro do tipo de Schmidt utilizado para determinação da dureza de Schmidt (R) nos ensaios em laboratório.....	15
Figura 3.5 – Ábaco que correlaciona o valor da dureza de Schmidt (R), com a resistência à compressão uniaxial (RCU) (Deere & Miller (1966) in Hoek (1981)).....	17
Figura 3.6 - Equipamento de Point Load Test que permite a determinação da resistência à carga pontual dos materiais rochosos.	19
Figura 3.7 - Tipos de provetes e requisitos para as dimensões dos diferentes provetes nos ensaios de resistência à carga pontual (ISRM, 1985).....	20
Figura 3.8 - Ruturas válidas e inválidas nos ensaios de carga pontual (ISRM, 1985).	21
Figura 3.9 - Ábaco para correção do tamanho dos provetes de rocha, para obtenção de um índice de resistência a carga pontual normalizado, para um diâmetro padrão de 50 mm (adaptado de Broch & Franklin (1972) in Stacey & Page, (1986)).....	22
Figura 3.10– Equipamento utilizado no ensaio de desgaste em meio húmido.	25
Figura 4.1 – Esquema representativo do tipo de avanço da escavação (Wickham <i>et al.</i> , 32	
Figura 4.2 - Ilustrações relativas a abertura das descontinuidades (adaptado de ISRM, 1978).....	37
Figura 4.3 - Perfis de rugosidade (ISRM, 1981 in Vallejo <i>et al.</i> , 2002).	39
Figura 4.4 - Atitude geológica de uma descontinuidade (adaptado Vallejo <i>et al.</i> , 2002)....	41

Figura 5.1 – Perdas de material no ensaio de desgaste em meio húmido em função do grau de alteração.....	48
Figura 5.2 – Prensa rígida servo-controlada utilizada para os ensaios de resistência compressão uniaxial.	49
Figura 5.3 – Mistura de enxofre com argilas no estado sólido.	50
Figura 5.4 – Molde usado para retificação dos provetes, com um dos topos já capeado.	50
Figura 5.5 - A) Provete antes do ensaio; B) Provete após o ensaio.....	50
Figura 5.6 - Resumo do ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico com a média, mínimo e máximo para os três graus de alteração.	52
Figura 5.7 – Provete instrumentado.....	54
Figura 5.8 - Comportamento tensão - deformação dos seis provetes de calcário estudados para os três graus de alteração (W1, W2 e W3).	56
Figura 6.1 – Relação entre as V_P e V_S para todos os provetes ensaiados em função do grau de alteração.....	60
Figura 6.2 – Resumo do ensaio da velocidade de propagação das ondas longitudinais com os valores médio, mínimo e máximo para os três graus de alteração.	60
Figura 6.3 - Relação entre as V_P e a dureza de Schmidt para todos os provetes ensaiados.	61
Figura 6.4 - Relação entre a V_P com $Is_{(50)}$ em função do grau de alteração.	61
Figura 6.5 - Relação entre a V_P e a RCU para os três graus de alteração.....	62
Figura 6.6 - Relação entre a V_P média e a porosidade média em função do grau de alteração.....	63
Figura 6.7 – Relação entre a dureza de Schmidt com a RCU.....	63
Figura 6.8 - Relação entre a RCU e a RCU obtida a partir da dureza de Schmidt e massa volúmica no ábaco de correlação.	64
Figura 6.9 - Relação entre a dureza de Schmidt e o $Is_{(50)}$	65
Figura 6.10 - Relação entre a RCU e o $Is_{(50)}$	65
Figura 6.11 – Relação entre a massa volúmica aparente e a porosidade em função do grau de alteração.....	66
Figura 6.12 – Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático.	67

Figura 6.13 - Relação entre a RCU média e a porosidade média em função do grau de alteração.....	68
Figura 6.14 – Relação entre o E_d médio e a porosidade média para os três graus de alteração estudados.....	69
Figura 6.15 – Comparação da RCU obtida pela prensa, carga pontual e esclerómetro to tipo de Schmidt em função do grau de alteração.....	70
Figura 6.16 - Relação entre as RCU e o índice de durabilidade no fim do segundo ciclo.	71
Figura 7.1 – Classificação da escavabilidade de maciços rochosos (adaptado de Franklin et al, 1971), com a projeção dos pontos para a escavabilidade dos calcários dolomíticos nos três estados de alteração.....	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação da IAEG (1979) para a velocidade das ondas longitudinais. ..	11
Tabela 3.2 - Variação da velocidade das ondas sísmicas longitudinais nos calcários em função da porosidade (adaptado de Lima & Menezes, 2008).	11
Tabela 3.3 – Classificação dos valores da massa volúmica aparente (adaptado IAEG 1979).	14
Tabela 3.4 – Classificação dos valores da porosidade de acordo com a IAEG (1979)	14
Tabela 3.5 - Classificação do material rochoso intacto, adaptado de Bieniawski (1979)..	23
Tabela 3.6 - Classificação de Aufmuth (1974), tendo atenção os resultados do 1º ciclo.	25
Tabela 3.7 - Classificação de Gamble (1971) para o Índice de durabilidade relativo ao 2º ciclo.	26
Tabela 4.1 – Sistema de Classificação Geomecânica de RMR (adaptado de Bieniawski (1989)).	31
Tabela 4.2 – Continuação da classificação Geomecânica de RMR com efeito da orientação das descontinuidades (adaptado de Bieniawski (1989)).	32
Tabela 4.3 – Classificação do maciço rochoso (adaptado de Bieniawski (1989)).	33
Tabela 4.4 - Qualidade do maciço rochoso em função do índice RQD, adaptação de Deere (1967).	34
Tabela 4.5 - Terminologia para caracterizar os maciços de acordo com o espaçamento das descontinuidades segundo a ISRM (1978, 1981).	35
Tabela 4.6 - Graus de alteração considerados pela ISRM (1981).	36
Tabela 4.7 - Descrição da continuidade das descontinuidades (ISRM, 1981).	37
Tabela 4.8 – Classificação as abertura das descontinuidades (adaptado de ISRM, 1978, 1981).	38
Tabela 4.9 - Classificação da rugosidade das descontinuidades (adaptado da ISRM, 1981).	39
Tabela 5.1 – Resumo dos resultados obtidos na determinação das velocidades de propagação das ondas dos ultra-sons.	44

Tabela 5.2 – Resultados obtidos na determinação da massa volúmica aparente e da porosidade aberta em função do grau de alteração.	45
Tabela 5.3 – Resultados da dureza de Schmidt, da massa volúmica e da correlação da resistência à compressão uniaxial.	46
Tabela 5.4 – Resultado do ensaio de carga pontual em função do grau de alteração.	47
Tabela 5.5 – Resultados dos ensaios da resistência á compressão uniaxial em função do grau de alteração.	51
Tabela 5.6 – Resumo dos resultados da determinação do módulo de deformabilidade e coeficiente de <i>Poisson</i> dinâmicos para os três graus de alteração.	52
Tabela 5.7 – Resultados dos módulos de elasticidade e coeficiente de <i>Poisson</i> para os três graus de alteração.	55
Tabela 5.8 - Resultado da classificação RMR para as 4 sondagens estudadas.	57
Tabela 6.1 – Médias dos dez parâmetros físicos e mecânicos determinados nos ensaios laboratoriais realizados no presente trabalho.	59
Tabela 6.2 – Comparação dos módulos de deformabilidade estáticos e dinâmicos para os calcários analisados.	67
Tabela 7.1 - Resumo dos coeficientes de correlação obtidos para os calcários dolomíticos das Camadas de Coimbra.	74

1. INTRODUÇÃO

Muitas obras de engenharia envolvem trabalhos à superfície do terreno ou em pequena profundidade, onde o material rochoso se encontra mais alterado ou é mais sujeito a uma alterabilidade quando se modificam as condições iniciais em que o material rochoso se encontra (Fookes *et al.*, 1988)

O objetivo principal do presente trabalho é contribuir para o conhecimento geotécnico dos calcários dolomíticos das camadas de Coimbra, designadamente para os seus diferentes graus de alteração. A caraterização dos calcários dolomíticos envolveu a determinação das suas propriedades físicas e mecânicas.

Neste estudo foram utilizados provetes de sondagens, estas últimas foram efetuadas numa campanha de prospeção realizada pela empresa Tecnasol FGE em Agosto de 2002, na zona designada como Alta da cidade de Coimbra, mais precisamente na área do Pólo 1 da Universidade.

A realização deste trabalho foi dividida em três fases: pesquisa bibliográfica, realização de ensaios laboratórios e análises dos resultados e caracterização geotécnica.

Para a caracterização do material rochoso foram efetuados sete ensaios em laboratório: porosidade aberta, dureza de Schmidt, determinação da velocidade de propagação das ondas longitudinais e transversais, resistência à carga pontual (*Point Load Test*), ensaio de desgaste em meio húmido, resistência à compressão uniaxial e definição do módulo de elasticidade.

Na realização dos ensaios começou-se pelos considerados não destrutivos e só posteriormente se realizaram os destrutivos, procedeu-se igualmente à análise dos resultados e à sua possível classificação.

Foram analisados vários parâmetros como a resistência do maciço rochoso, o *Rock Quality Designation* (RQD), espaçamento e condições das discontinuidades, com a finalidade de aplicar a classificação geomecânica *Rock Mass Rating* (RMR) de Bieniawski (1989) para classificar o maciço rochoso em que se efetuaram as sondagens.

Com base nos resultados obtidos na execução dos ensaios de laboratório tentaram-se estabelecer correlações, procedendo-se ao estudo e definição do comportamento geotécnico dos calcários dolomíticos.

1.1. Organização do trabalho

Na organização de toda a informação desta dissertação e de forma a tornar-se mais perceptível, foi dividida em sete capítulos que são de seguida descritos:

No Capítulo 1 explicam-se os vários objetivos do trabalho, bem como a metodologia utilizada para atingir esses fins.

O Capítulo 2 consiste na caracterização física da área em estudo, ou seja, a localização geográfica e o enquadramento geológico da região onde se desenvolveu o presente trabalho.

No Capítulo 3 é feita uma introdução aos ensaios laboratoriais. São descritas as metodologias e recomendações que posteriormente vão ser utilizadas para a realização dos ensaios laboratoriais.

O Capítulo 4 apresenta uma descrição detalhada da classificação geomecânica *Rock Mass Rating* (RMR) utilizada para a classificação do maciço rochoso. Foram descritos detalhadamente os seis parâmetros principais que esta classificação aborda.

No Capítulo 5 são descritas algumas metodologias utilizadas na realização dos ensaios laboratoriais neste trabalho e são apresentados os resultados dos mesmos.

No Capítulo 6 é desenvolvida a interpretação e a discussão dos resultados. São comparados e relacionados os vários resultados obtidos através da realização dos ensaios laboratoriais e discutidas as hipóteses de correlações entre si.

No Capítulo 7 são apresentadas as considerações finais estabelecidas no decorrer da investigação, realçando as principais correlações obtidas.

2. ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO

2.1. Enquadramento geográfico

A área de estudo do presente trabalho enquadra-se na Região Centro de Portugal, no concelho de Coimbra. Esta área está representada na folha 230 e 241 da carta militar de Portugal de escala 1/25000, designadas respetivamente como Coimbra Norte e Sul (Serviços cartográficos do exército 2012).

O local situa-se na “Alta” da cidade de Coimbra, mais precisamente no Pólo I da Universidade de Coimbra, e pertence à União das Freguesias de Coimbra (Sé Nova, Santa Cruz, Almedina e São Bartolomeu).

Na Figura 2.1 apresenta-se a área de estudo e a localização das sondagens estudadas.

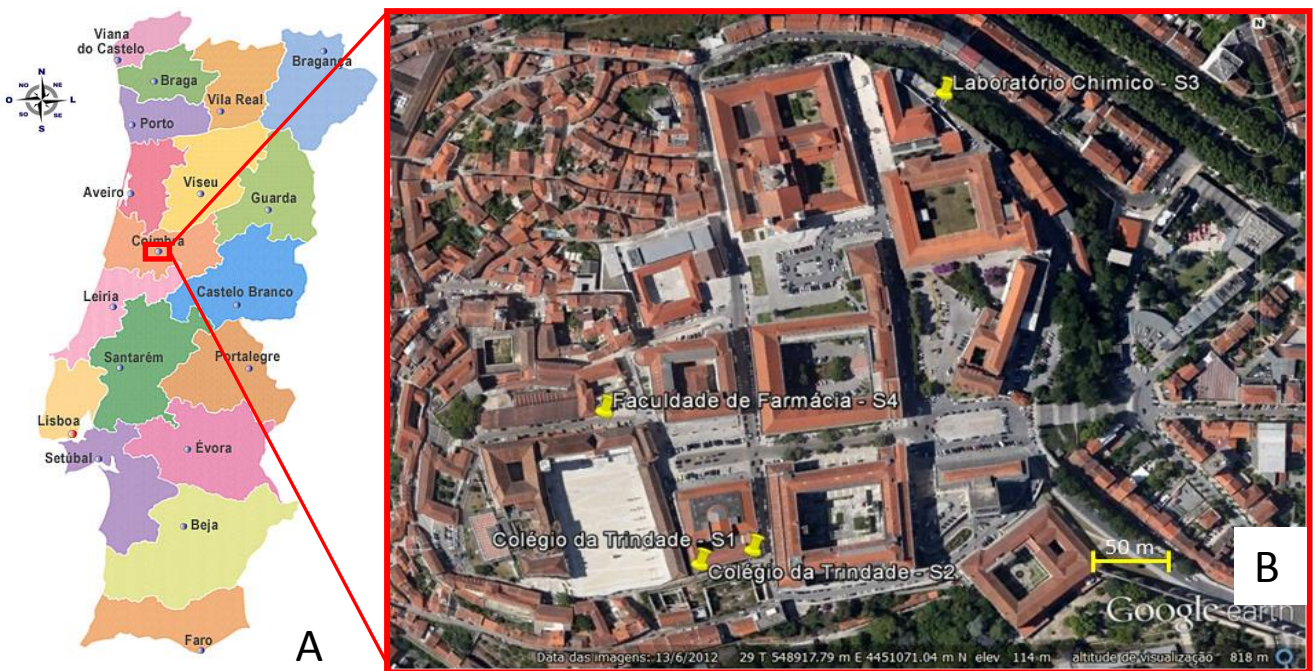


Figura 2.1 – A) Mapa de Portugal continental; B) Localização da área em estudo a partir do *Google Earth* (2014).

2.2. Enquadramento geológico regional

A região de Coimbra situa-se no confronto entre o Maciço Hespérico, onde ocorrem formações do Pré-câmbrico e do Paleozóico (Teixeira, 1981) e da Orla Meso-Cenozóica Ocidental (Ribeiro *et al.*, 1996). As unidades geológicas representativas da cidade de

Coimbra que se enquadram na sub-zona setentrional da Bacia Lusitânia apresentam-se sob a seguinte disposição:

Preenchimento de uma sucessão detrítica terrígena continental que corresponde ao Grupo Grés de Silves e pertence ao Triásico-Hetangiano (Soares & Marques, 1986). Este grupo é constituído por três subunidades litoestratigráficas que são referenciadas como: Formação da Conraria, Formação de Castelo Viegas e Formação de Pereiros (Soares *et al.*, 1985). Na Figura 2.2 localiza-se a área estudada assim como as unidades geológicas presentes.

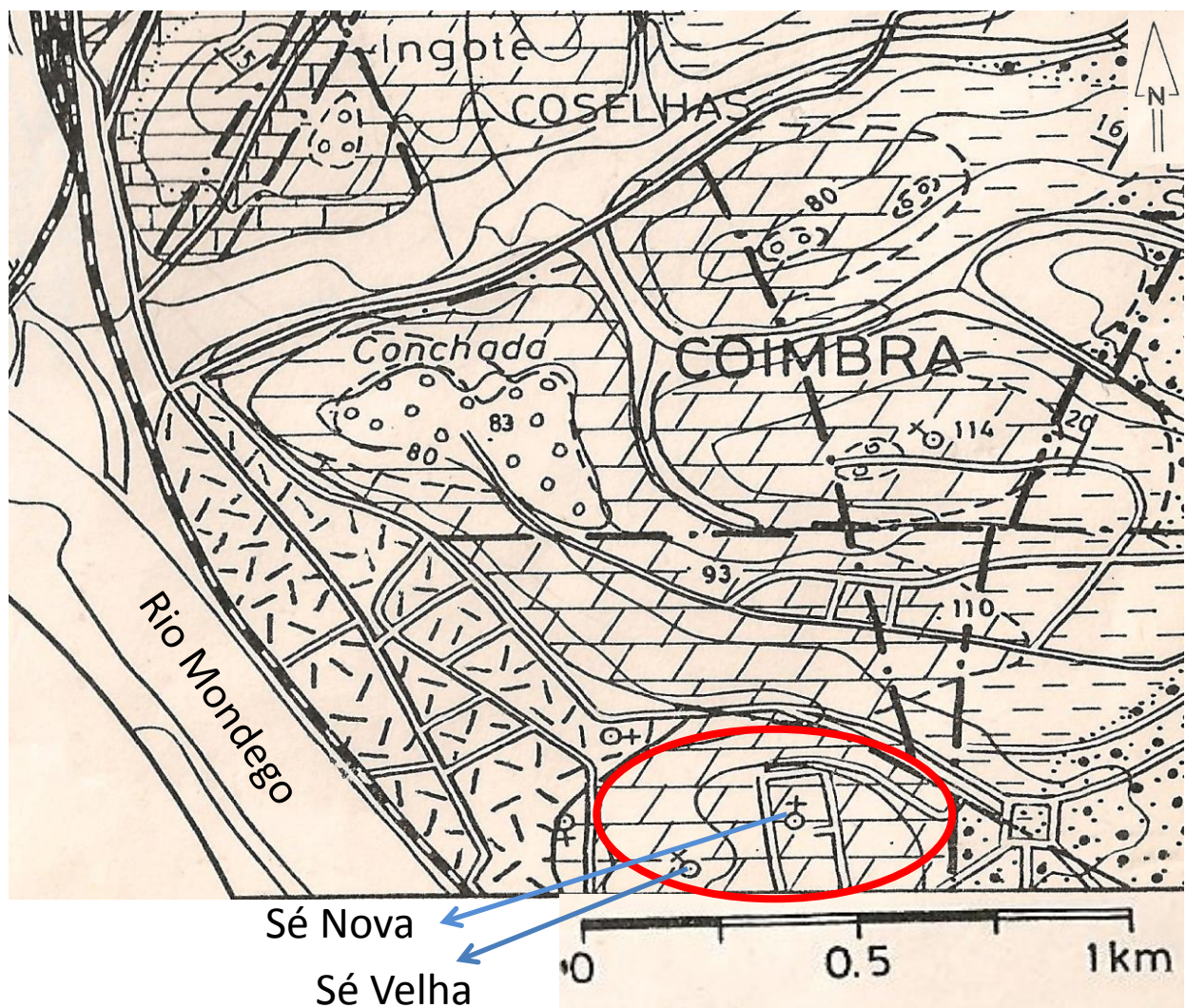


Figura 2.2 A - Extrato da carta geológica de Coimbra Norte (Adaptado de Soares *et al.* (1985)). O local de estudo encontra-se assinalado com um círculo de cor vermelha.

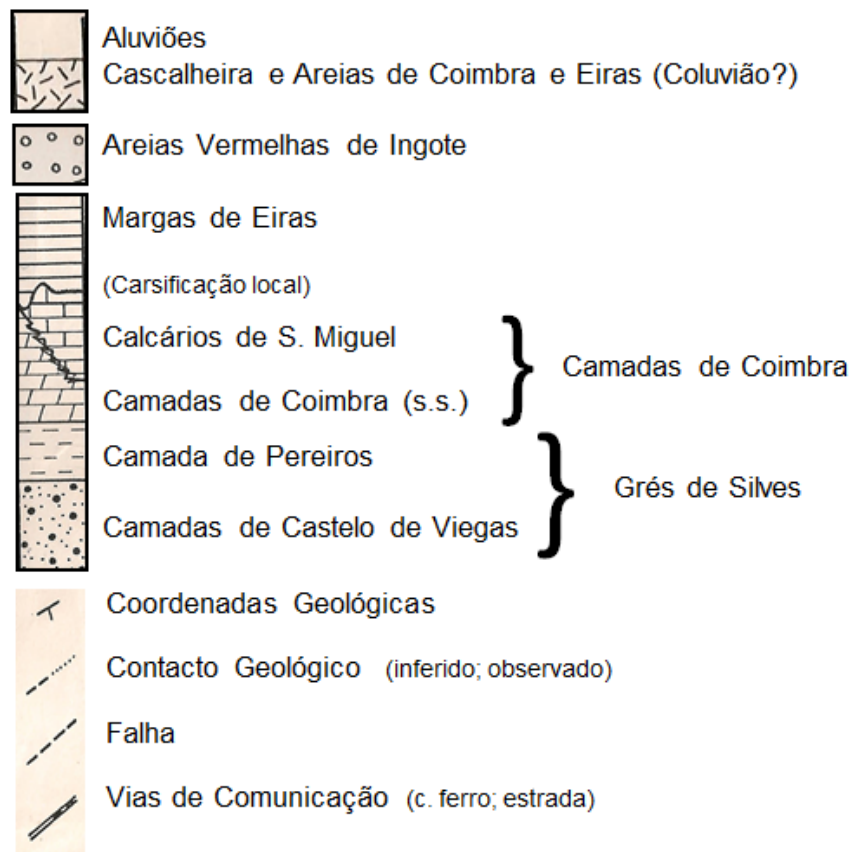


Figura 2.2 B – Legenda do extrato da carta geológica de Coimbra Norte (Adaptado de Soares *et al.* (1985))

A Formação da Conraria corresponde à unidade “*Grés à rouge brique*” de Choffat (1880 - 1903). É essencialmente constituída por depósitos formados por materiais areno-conglomeráticos, podendo também por vezes apresentar arcoses e subarcoses, muito grosseiras, e essencialmente conglomeráticas, subcompactadas a compactadas, com estruturas obliquas e/ou em ventre.

A Formação Castelo Viegas apresenta-se constituída principalmente por arenitos vermelhos podendo ser beges, conglomerados, correspondendo a uma litofácies característica de depósitos de torrente e de rios que corriam de E para W (Ribeiro *et al.*, 1979).

A Formação de Pereiros é essencialmente constituída na base por arenitos, enquanto no seu corpo superior destacam-se os pelitos e os dolomitos arenosos.

Posteriormente ocorre a presença de uma série predominantemente carbonatada do Lias, Dogger e parte do Malm terminando na unidade Arenitos da Boa Viagem do Kimeridgiano-Portlandiano (Rocha *et al.* (1981); Soares *et al.* (1985); Soares *et al.* (1986); Barbosa *et al.* (1988); Soares & Gomes 1997). Na série predominantemente carbonatada e assente sobre os corpos das camadas de Pereiros verifica-se a presença das Camadas de

Coimbra s.l., sendo que Soares et al. (1985) procederam à sua divisão em Camadas de Coimbra s.s., correspondendo estas à parte inferior, e em Camadas de S. Miguel.

A formação das *Camadas de Coimbra*, pertencente ao Jurássico Inferior, de acordo com Soares et al. (1985) é composta essencialmente “*por espessas bancadas dolomíticas, castanhas, homogéneas e/ou com entrecruzado de baixo ângulo. Sobre elas aparece uma lentícula de marga cinzenta, localmente violácea, por vezes brechóide e com extraclastos de dolomia. Surgem novas camadas dolomíticas, que no contacto com as margas, têm aspectos brechóide*”.

A formação das *Camadas de Coimbra* é em termos de idade datada essencialmente do Sinemuriano. Na base é composta por um membro dolomítico, constituído por dolomites e calcários pouco fossilíferos (“*Camadas de Coimbra s.s.*” Soares et al., 1985). No topo é constituída por um membro calcário, caracterizado por calcários interstratificados com níveis centimétricos de margas (“*Calcários de S. Miguel*”, Soares et al., 1985; Rocha et al., 1990).

Por fim verifica-se a presença de unidades detríticas e carbonatadas do Cretácico descritas, entre outros, por Soares (1966), Rocha et al. (1981), Reis (1983), Soares & Reis (1984), Soares et al. (1986), Barbosa et al. (1988) a que se sobrepõem em discordância a Formação argilgrosseira e conglomerática da Sra. do Bom Sucesso do Oligocénico.

Em relação à hidrogeologia, verifica-se a presença de diversos sistemas aquíferos importantes que estão associados às formações carbonatadas. A circulação de água subterrânea processa-se ao longo de sistemas aquíferos cársicos ou porosos. As estruturas cársicas ocorrem nos calcários e dolomites através da dissolução dos carbonatos, muitas vezes a partir das superfícies das discontinuidades.

2.3. Enquadramento geológico local

O volume calco-dolomítico das Camadas de Coimbra na Alta da Cidade tem por limite a Este, o vale do jardim Botânico, e a norte, a Avenida Sá da Bandeira e a Oeste, de modo aproximado as ruas Ferreira Borges e Visconde da Luz. A Alta da Cidade corresponde a um simples degrau estrutural, resistente, e com uma espessura de 60 ± 20 m de dolomias e calcários dolomíticos a sobreporem-se aos pelitos e margas das Camadas de Pereiros (Soares et al., 1985).

O maciço é constituído por calcários de grão fino. Os calcários dolomíticos apresentam frequentes veios de calcite e dolomite, e evidenciam de modo esporádico

alguma carsificação, esta está relacionada com um sistema de aquíferos cársicos, pode apresentar-se vulnerabilidade à contaminação.

Regista-se a presença nas Camadas de Coimbra de um sistema de falhas normais de direções N-S, NNE-SSW, NW-SE; NNW-SSE e NE-SW (Soares *et al.*, 1984).

Os calcários estudados apresentam-se são a muito alterados. Os calcários constituídos por rocha são correspondem ao estado de alteração W1, sendo o W2 considerado pouco alterado, mas com um maior grau de fissuração do que os calcários W1, enquanto os calcários W3 apresentam-se mais fissurados e menos compactos, com uma tonalidade amarela mais escura que os W1 e W2. Os calcários W4 (muito alterados) encontram-se mais desagregados, com uma cor acastanhada, e apresentam material argiloso, no estudo efetuado os calcários muito alterados não foram considerados devido às quantidades pouco expressivas que foram encontradas nas diferentes sondagens utilizadas.

Por vezes surgem preenchimentos silto-argilosos esbranquiçados ou de tonalidades amareladas nas fraturas, e pequenas passagens argilificadas (decompostas) que podem ter uma composição margosa. Verifica-se a presença de veios de calcite de cor amarelada a esbranquiçada e de espessura de 1 a 5 mm.

Os níveis de fraturação apresentam um espaçamento entre fraturas desde afastadas (0,6 a 2 m) a muito próximas (< 6 cm), embora o primeiro caso seja pouco comum.

Por vezes também são detetadas brechas calcárias que se podem apresentar desagregadas a compactas, de tonalidades amareladas, com alguns veios de calcite de cor esbranquiçada. As brechas apresentam fraturas com um espaçamento medianamente afastadas (0,2 a 0,6 m) a muito próximo (< 6 cm). Não se procedeu ao estudo das brechas por não existirem quantidades suficientes nas sondagens analisadas.

3. ENSAIOS EM LABORATÓRIO

O conhecimento do processo de formação das rochas é muito importante, se não mesmo crucial, na correta interpretação da variação das características físicas, e na sua relação com outras características tais como a resistência à compressão, o comportamento ao desgaste e o comportamento à alteração mecânica.

Neste capítulo são descritos os ensaios que posteriormente foram efetuados em laboratório. Na realização dos vários ensaios laboratoriais descritos neste capítulo, efetuaram-se em primeiro lugar os ensaios não destrutivos, e só posteriormente os ensaios que implicavam a destruição ou rotura dos provetes utilizados.

3.1. Ensaio de velocidades de ondas de ultra-sons

O ensaio de determinação das velocidades de ultra-sons permite definir a velocidade das ondas longitudinais (V_p) e transversais (V_s) que atravessam provetes de material rochoso seco ou saturado em água. A velocidade das ondas está relacionada com as características mecânicas do material, resistência e deformabilidade, podendo determinar-se o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) e coeficiente de *Poisson* dinâmico (ν_d), (Vallejo, *et al.*, 2002). O equipamento para os ensaios de ultra-sons apresenta-se constituído por unidades funcionais, um transdutor emissor/recetor ou um transdutor emissor e um transdutor recetor e respetivos dispositivos de visualização (NDT, n.d.).

O transdutor é um aparelho eletrónico apto para a conversão de energia elétrica em energia mecânica, através de impulsos eletrónicos de alta voltagem que são convertidos em energia de frequência ultrassónica. A energia sonora é direcionada pelo emissor e introduzida e propagada através dos materiais na forma de ondas.

No decorrer do percurso, quando a onda se depara com uma descontinuidade parte da sua energia é refletida a partir da superfície desta descontinuidade. O sinal da onda refletida, ou eco acústico, é captado pelo recetor e convertido novamente em sinal elétrico exibindo-se no dispositivo de visualização.

Apresenta a vantagem de não ser destrutivo e de ser de aplicação fácil, rápida e sensível à anisotropia da matéria, este tipo de ensaio permite a caracterização dos mais variados materiais (Velho & Gomes, 1997).

Quando atravessa meios sólidos e líquidos a velocidade das ondas ultrassónicas é bastante elevada, no entanto, em meio gasoso é facilmente atenuado, ou até mesmo nula.

Consoante as densidades e elasticidade de cada material regista-se uma vasta variação das velocidades (ASNT, 1981). A velocidade apresenta também alterações devido a fatores físico-mecânicos, como a composição das conexões inter cristalinas, a porosidade, a mineralogia, o teor em água e o grau de alteração das rochas (El-Gohary, 2012).

O emissor é a origem das descargas de energia elétrica, que por sua vez, são ativadas pelo temporizador e transmitidas para o transdutor. Os pulsos de retorno da amostra ensaiada chegam ao recetor que se encontram a uma distância conhecida, assim o tempo entre a partida e chegada do pulso é apresentado no dispositivo de visualização do aparelho (El-Gohary, 2012)

A diferença do ajuste de um transdutor numa superfície com rugosidade de graus distintos é significativa como se verifica na Figura 3.1, numa superfície onde a rugosidade seja de menor amplitude ocorre uma emissão do feixe de som mais eficaz, isto é a área de contacto entre a superfície da amostra e o transdutor é maior.

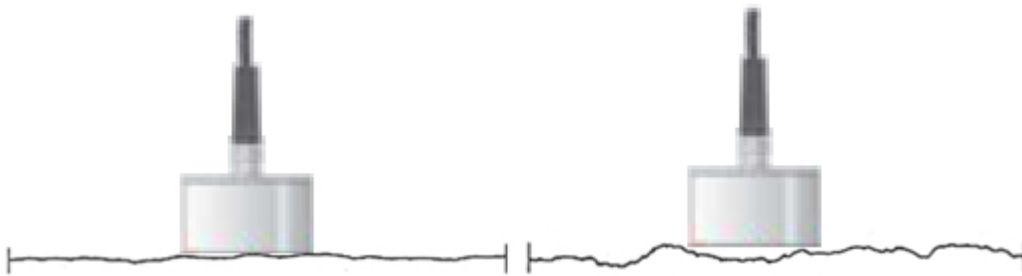


Figura 3.1 - Esquema ilustrativo do ajuste de um transdutor em superfícies com diferentes graus de rugosidade.

A rugosidade das superfícies altera os resultados ultrassónicos, como a perda do poder de resolução, o alargamento do feixe sónico e a perda da amplitude do eco a partir das descontinuidades da amostra (ASNT, 1981).

O equipamento de ultrassom portátil que foi utilizado neste trabalho foi o *Pundit Lab* (*Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester*) da *Proceq*, corresponde a um equipamento baseado no método de velocidades de impulso, que providencia informações acerca da uniformidade, cavidades, fissuras, bem como, defeitos do material em estudo. Este equipamento pode determinar o comprimento do trajeto, a profundidade de fraturas perpendiculares, a velocidade de superfície, bem como a tradicional medição do tempo de trânsito das ondas ultrassónicas e a velocidade do impulso (*Proceq*, n.d.).

Através deste equipamento obtém-se a forma da onda em tempo real e a respetiva transmissão dos resultados gravados na sua memória quando conectado a um computador.

A unidade de leitura de dados faz-se acompanhar de três pares de transdutores diferentes, sendo de 54 kHz, 24 kHz e 250 kHz, um bloco de calibração e cabos de conexão.

Nos ensaios de ultrassons o acoplante é essencial e deve ser aplicado entre as faces do transdutor e da amostra a ensaiar, de modo a auxiliar a transmissão de energia ultrassónica entre as faces. Para se obter um resultado de sucesso, é fundamental obter um bom sinal, e para que seja possível usa-se um acoplamento acústico adequado dos transdutores à superfície em teste (Leong *et al.*, 2004). Um material do tipo acoplante, origina um deslocamento do ar existente sobre a superfície da amostra, o que provoca uma maior energia do som na amostra e um melhoramento do sinal ultrassónico. O problema na transmissão de energia existe perante a diferença de impedância acústica existente entre o ar e a amostra (sólido), o que origina que parte da energia acabe por ser refletida e só uma parte desta seja transmitida para a amostra (NDT, n.d.).

Os materiais mais utilizados neste processo são a glicerina, vaselina e a água. Na Figura 3.2 mostra-se como se deve aplicar a pasta de acoplamento, aplicando uma camada fina nos transdutores e na superfície da amostra a ensaiar.

Deve ser efetuada uma preparação da superfície, através de uma limpeza de modo a remover todo o tipo de sujidade e alisando-a com uma superfície abrasiva.

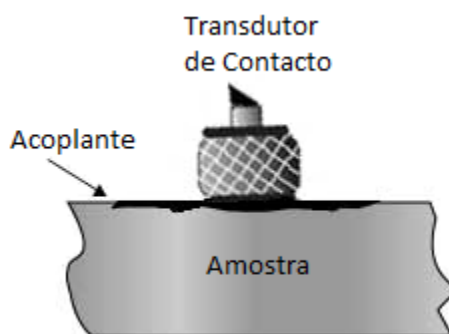


Figura 3.2 - Esquema do acoplante entre as faces do transdutor e da amostra (NDT, n.d.).

Para a obtenção da qualidade do material por ação da medição da velocidade das ondas de ultrassom (expressão 1), o equipamento realiza medições precisas do tempo de transmissão através da amostra em estudo.

$$V = \frac{L}{t} \quad (1)$$

Onde: V - velocidade de propagação da onda (m.s⁻¹);

L - comprimento percorrido (m);
t - tempo de trânsito (s).

Este equipamento de ultrassom apresenta indicações sobre o tempo que o impulso emitido demora entre o transmissor e o recetor.

Na Tabela 3.1 pode observar-se a classificação definida pela IAEG (1979) para a velocidade das ondas longitudinais.

Tabela 3.1 - Classificação da IAEG (1979) para a velocidade das ondas longitudinais.

Velocidade dos ultra-sons	Descrição (m.s⁻¹)
Muito baixa	<2500
Baixa	2500 – 3500
Média	3500 – 4000
Elevada	4000 – 4500
Muito elevada	>4500

A porosidade é umas das propriedades físicas a ter em conta para a variação da velocidade das ondas sísmicas longitudinais, na Tabela 3.2 verifica-se esta variação nos calcários.

Tabela 3.2 - Variação da velocidade das ondas sísmicas longitudinais nos calcários em função da porosidade (adaptado de Lima & Menezes, 2008).

Calcários	
Porosidade Total (%)	Velocidade de Ondas Longitudinais (m.s⁻¹)
1	6500
5	6000
10	5200
20	4000
30	3000
45	1850

3.2. Determinação da massa volúmica aparente e porosidade aberta

A porosidade das rochas tem uma importância variável consoante o tipo litológico e a aplicação pretendida. Nas rochas ígneas, o desenvolvimento da porosidade encontra-se geralmente associado ao aumento da alteração e da tectonização. Nas rochas sedimentares, a origem clástica ou química, as condições de formação, os processos diagenéticos e a tectónica vão condicionar de modo diverso a porosidade da rocha. A porosidade influencia o comportamento das rochas, pelo que só o conhecimento pormenorizado em cada litotipo permite avaliar a sua influência no comportamento do material rochoso.

A presença de poros na estrutura do material rochoso diminui a sua resistência e aumenta a sua deformabilidade. À baixa densidade de rocha é usual corresponder uma porosidade elevada. Técnicas microscópicas utilizadas para determinar volumetricamente o espaço ocupado pelos grãos minerais não são suficientes para estimar em termos volumétricos os poros, pelo que se recorre ao uso de técnicas experimentais.

A porosidade aberta do material rochoso no presente trabalho foi estabelecida de acordo com a norma prEN 1936 CEN (1997).

O procedimento utilizado para a realização do ensaio de porosidade aberta foi o seguinte:

Inicialmente pesam-se os provetes de rocha para obtenção da massa sólida M_s previamente secos numa estufa a 105° C durante 24 horas para cada estado de alteração (W1, W2 e W3). Posteriormente os provetes de rocha são submetidos ao vácuo num recipiente, a uma pressão constante de cerca de 2,0 kPa, durante 24 horas de modo a retirar o ar dos vazios da rocha (Figura 3.3). Seguidamente os provetes são submersos em água desmineralizada, sem que haja perda de vácuo. Nesta fase o vácuo é mantido durante 24 horas, após as quais se deixam as amostras submersas mais 24 horas à pressão atmosférica. Após este procedimento efetua-se a pesagem hidrostática de cada amostra, obtendo-se M_{sub} . Posteriormente, procede-se à limpeza de cada um dos provetes com um pano húmido, tendo o cuidado de não retirar água do interior dos provetes, e efetua-se a pesagem das amostras saturadas em água obtendo-se M_{sat} .



Figura 3.3 – Ensaio de massa volúmica aparente e porosidade aberta.

O cálculo da porosidade é obtido a partir da expressão (2):

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

Onde: P - porosidade (%);

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

M_s - massa da amostra seca (g);

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

Pode calcular-se a massa volúmica aparente em ($N.m^{-3}$) usando a expressão (3):

$$MVA = \frac{M_s}{(M_{sat} - M_{sub})} \times \rho_w \quad (3)$$

Onde: MVA - massa volúmica aparente;

ρ_w - a densidade da água (998 kg.m^{-3})

De acordo com a norma prEN 1936 (CEN, 1997), para rochas densas 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 massa volúmica real, o que está de acordo com os procedimentos adotados para os provetes estudados.

Nas Tabelas 3.3 e 3.4 podem verificar-se, respetivamente, as classificações dos valores da massa volúmica aparente e da porosidade segundo a IAEG (1979).

Tabela 3.3 – Classificação dos valores da massa volúmica aparente (adaptado IAEG 1979).

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

Tabela 3.4 – 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

3.3. Determinação da dureza de Schmidt

Os ensaios realizados com esclerómetro do tipo de Schmidt (martelo de Schmidt) permitem estimar de forma aproximada a resistência à compressão simples do material rochoso (Figura 3.4). Este ensaio pode ser *“in situ”* ou em laboratório, neste último caso utilizando uma base apropriada, no presente estudo realizaram-se os ensaios em laboratório. Este ensaio é considerado não destrutivo, pelo que o material rochoso deve permanecer praticamente intacto após a execução dos ensaios.

A utilização do esclerómetro do tipo de Schmidt esteve no início da sua aplicação relacionado com a determinação da dureza do betão (Schmidt, 1951) tendo sido posteriormente utilizado para definir a resistência do material rochoso.

Os valores obtidos nos ensaios realizados com o esclerómetro do tipo de Schmidt correspondem ao ressalto da haste de aço que o equipamento possui na sua extremidade, quando esta haste é pressionada contra a superfície do material cuja dureza se pretende definir, o valor do ressalto permite determinar a dureza de Schmidt (R). A medição do ressalto é determinada através de uma escala que se encontra incorporada no próprio martelo de Schmidt e que varia entre 10 a 100.



Figura 3.4 – Esclerómetro do tipo de Schmidt utilizado para determinação da dureza de Schmidt (R) nos ensaios em laboratório.

Os ensaios de determinação da dureza são de fácil realização, sendo o martelo de Schmidt facilmente transportável. No entanto este ensaio apresenta algumas restrições, designadamente quando a resistência dos materiais testados é muito reduzida ou muito elevada, para os primeiros podem verificar-se danos ou desintegrar o material no local de impacto (Andrade, 2004). Os valores de R podem ser influenciados pelas propriedades do material rochoso, como a resistência, módulo de elasticidade e a própria rugosidade superficial (Katz *et al.*, 2000).

Dentro das limitações dos ensaios com o martelo de Schmidt deve destacar-se que os ensaios realizados em superfícies podem corresponder na íntegra ao material rochoso que se pretende estudar. As superfícies de descontinuidade do material rochoso, quando próximas da superfície testada, podem influenciar, de modo determinante, os valores obtidos nos ensaios, nomeadamente na determinação da resistência “*in situ*”, através da utilização esclerómetro do tipo de Schmidt (Hack, 1998).

Os ensaios foram efetuados de acordo com as recomendações da ISRM (1981). O martelo de Schmidt utilizado foi um modelo do tipo L, cuja energia de impacto é de 0,73 N.m.

As determinações de R foram efetuadas em todos os provetes utilizados nos diferentes ensaios de caracterização, tendo sido realizadas 20 medições, em cada provete, destas medições foram excluídos os 10 valores mais baixos, e só se consideram os restantes 10, sendo posteriormente efetuada a média destes valores, o que está de acordo com as sugestões do ISRM (1978).

Os valores de R podem ser utilizados para definir a resistência à compressão simples do material ensaiado. A resistência à compressão simples (RCU) pode obter-se a partir do ábaco de Deere & Miller (1966) que se apresenta na Figura. 3.5, em que se consideram os valores de R, a massa volúmica do material rochoso testado e a inclinação do martelo.

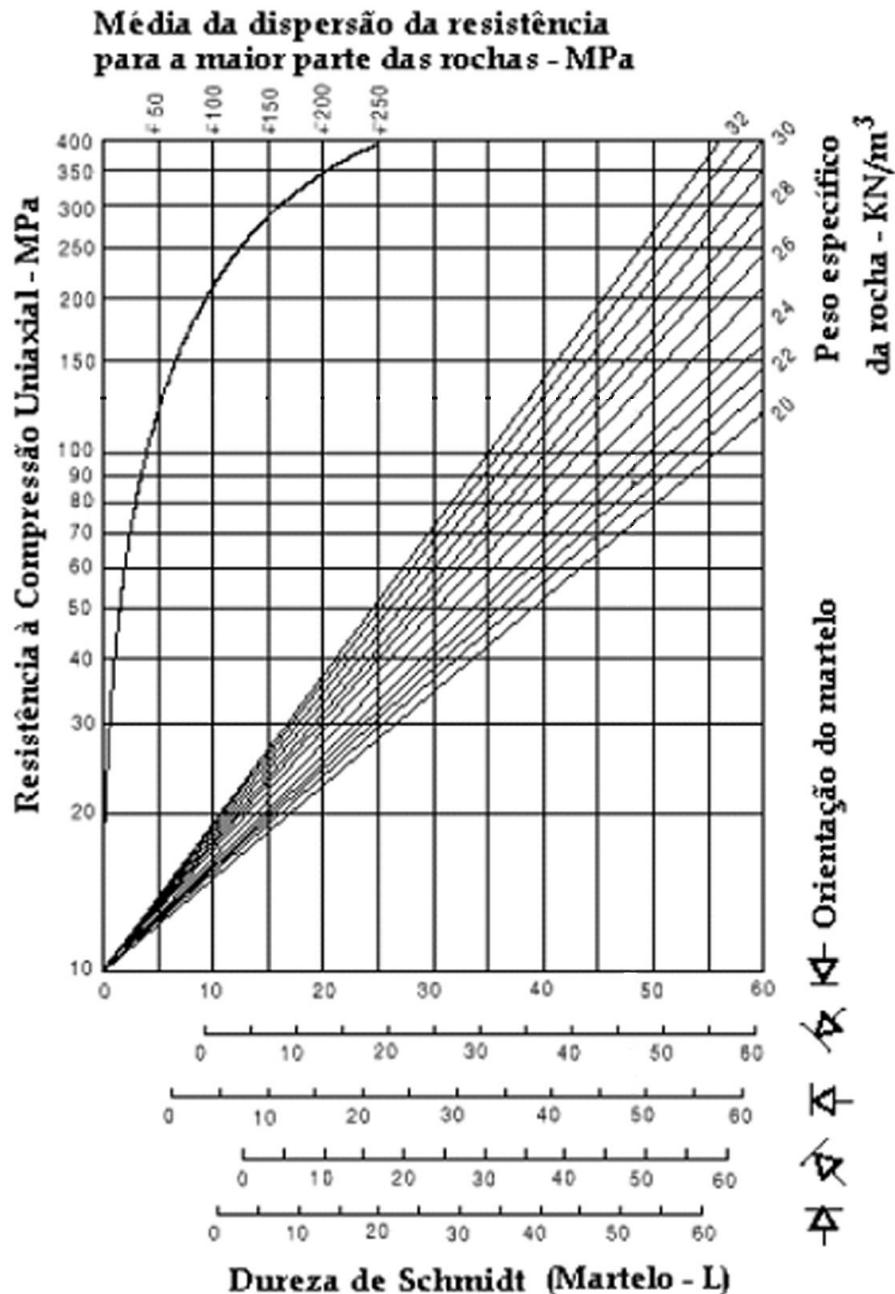


Figura 3.5 – Ábaco que correlaciona o valor da dureza de Schmidt (R), com a resistência à compressão uniaxial (RCU) (Deere & Miller (1966) in Hoek (1981)).

3.4. Ensaio de resistência à carga pontual (“*point load Strength*”)

O ensaio de carga pontual constitui um ensaio que possibilita determinar a resistência dos materiais rochosos. Este ensaio pode ser utilizado para estimar outros parâmetros de resistência com os quais se relaciona, como a tração uniaxial, a compressão uniaxial (Bieniawski, 1975; ISRM, 1985) e mesmo a resistência triaxial (Bieniawski, 1974). O

incremento do teor em água nas amostras provoca uma diminuição da resistência à carga pontual (Broch, 1974). O ensaio de carga pontual resultou da contribuição de vários autores ao procurarem estabelecer um índice de resistência prático mas simultaneamente sensível e fiável (Broch & Franklin, 1972).

Por ser de fácil execução, este ensaio encontra-se muito divulgado atualmente, podendo facilmente ser realizado sobre tarolos de sondagens ou amostras irregulares sem grande preparação prévia. O equipamento utilizado na sua execução é simples, de fácil transporte e operação, adequando-se bem à necessidade de caracterizar os materiais “*in situ*” (Price *et al.*, 1978).

Os ensaios foram executados tendo em atenção as recomendações da ISRM (1985), o equipamento utilizado apresenta uma capacidade máxima de carga até 60 kN. Neste equipamento estão presentes dois manómetros (Figura 3.6) sendo que um deles possui uma capacidade de medição até 5,6 kN e o outro possui uma capacidade de medição que atinge os 60 kN. Este equipamento é ainda constituído por duas ponteiras cónicas e uma bomba hidráulica.

Ao contrário dos ensaios com o martelo de Schmidt, nos ensaios do “*Point Load Test*” procura-se provocar a rotura do material rochoso. Constituem ensaios relativamente expeditos e que também podem ser realizados “*in situ*”, no presente trabalho os ensaios de resistência à carga pontual foram executados em laboratório.

O ensaio consiste na colocação dos provetes a testar entre as duas ponteiras cónicas. De seguida, é aplicada uma carga, através das referidas ponteiras, de modo a provocar a rotura do material. A carga responsável pela rotura (P) do material é registada num manómetro.

A aplicação de uma carga concentrada pelas ponteiras induz na amostra uma força de tração normal à carga aplicada que, eventualmente, provoca a rotura segundo um ou mais planos com a mesma orientação da carga (Broch & Franklin, 1972).



Figura 3.6 - Equipamento de Point Load Test que permite a determinação da resistência à carga pontual dos materiais rochosos.

Neste ensaio também se podem utilizar provetes que não apresentem formas cilíndricas, é possível a realização de ensaios com provetes paralelepípedicos e irregulares, tendo estes provetes que obedecer aos critérios estabelecidos pela ISRM (1981) (Figura 3.7).

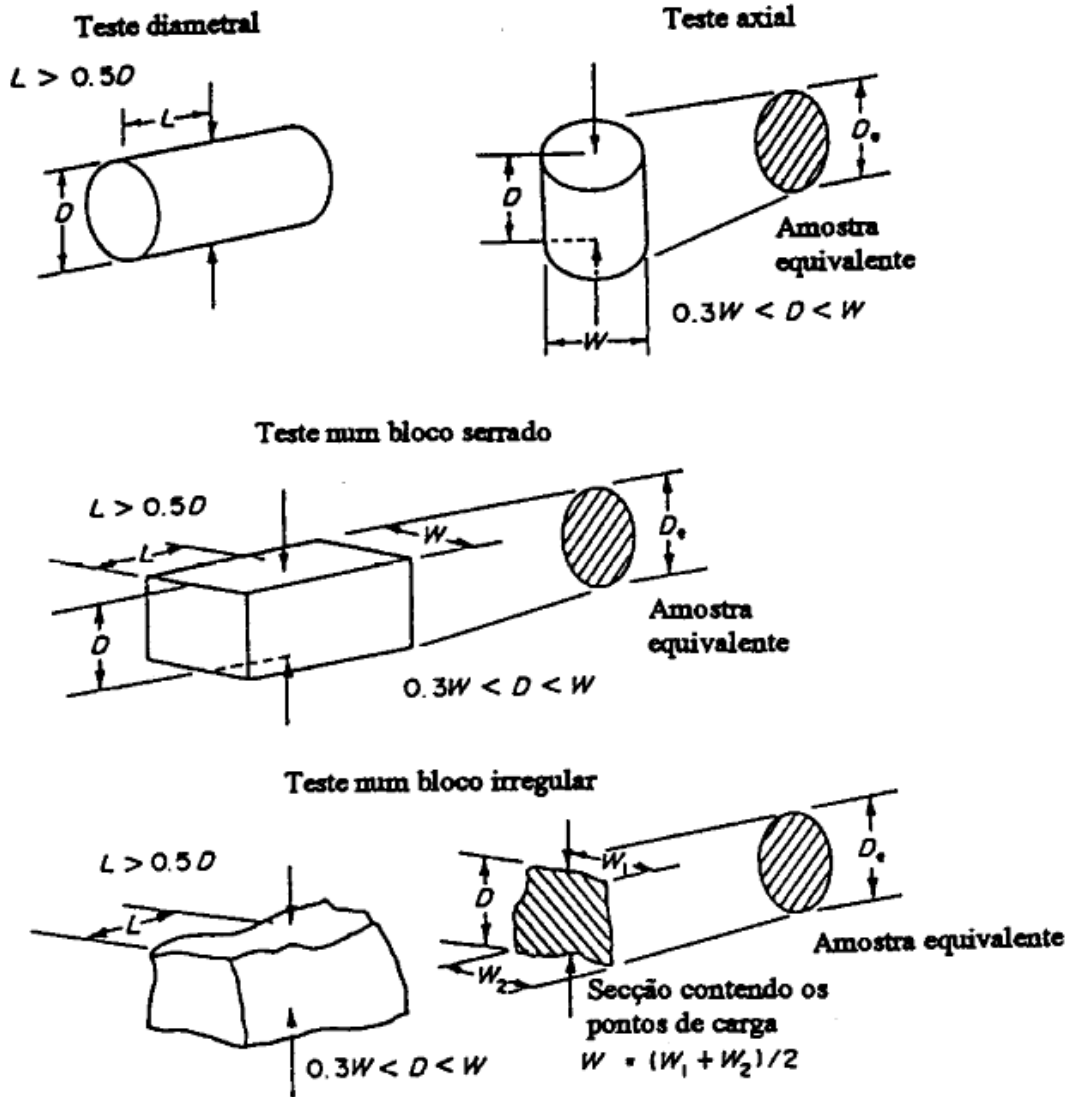


Figura 3.7 - Tipos de provetes e requisitos para as dimensões dos diferentes provetes nos ensaios de resistência à carga pontual (ISRM, 1985).

Para validação dos resultados é necessário que a superfície de rotura passe pelos pontos onde a carga foi aplicada, como é exemplificado na Figura 3.8 relativa à validação dos ensaios de resistência à carga pontual.

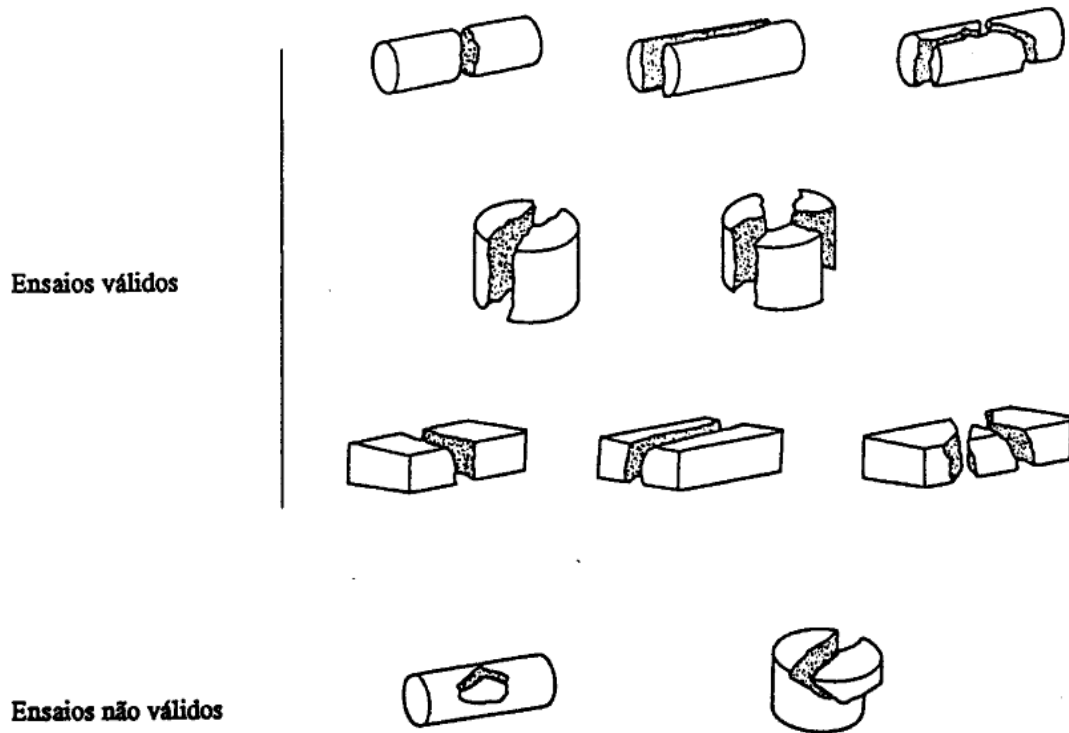


Figura 3.8 - Rupturas válidas e inválidas nos ensaios de carga pontual (ISRM, 1985).

A determinação do índice de resistência à carga pontual (I_s) foi efetuada segundo as recomendações da Sociedade ISRM (1985). No presente caso de estudo os provetes são cilíndricos, logo regulares. Os resultados do ensaio são calculados pela expressão 4:

$$I_s = \frac{P}{De^2} \quad (4)$$

Onde: I_s = índice de carga pontual ou índice de resistência à carga pontual;

P = carga aplicada no momento de rotura;

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

Quando as amostras ensaiadas correspondem a provetes cilíndricos de diâmetro diferente de 50 mm, efetua-se a correção dos resultados por um dos métodos sugeridos pela ISRM (1985) de modo a obter-se o valor da resistência à carga pontual corrigida para um diâmetro de 50 mm ($I_{s(50)}$).

O valor do fator de correção (F) obtém-se através da expressão 5.

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45} \quad (5)$$

Obtido os valores de I_s e o F , prossegue-se com o cálculo do $I_{s(50)}$ que é obtido pela expressão 6.

$$I_{s(50)} = F \times I_s \quad (6)$$

É de notar que esta correção, para provetes cilíndricos, pode ser definida através de um ábaco (Figura 3.9).

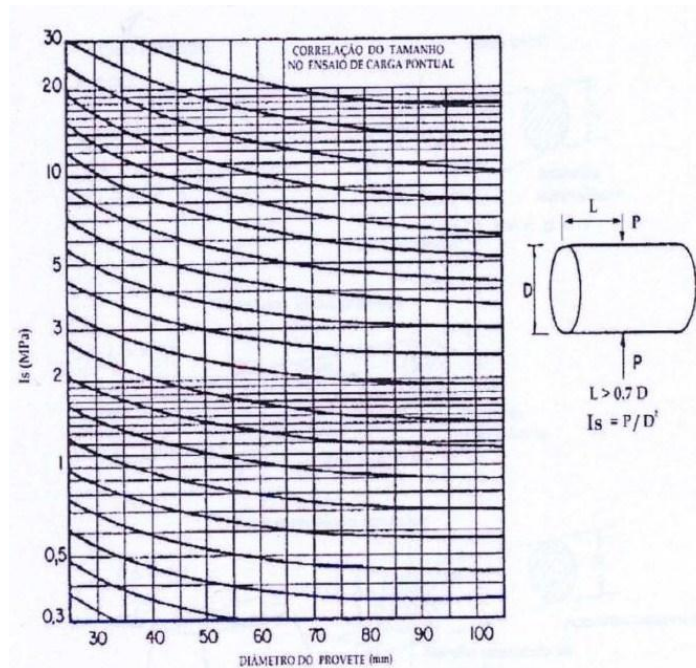


Figura 3.9 - Ábaco para correção do tamanho dos provetes de rocha, para obtenção de um índice de resistência a carga pontual normalizado, para um diâmetro padrão de 50 mm (adaptado de Broch & Franklin (1972) in Stacey & Page, (1986)).

Do conjunto dos ensaios válidos para cada tipo de material rochoso, devem ser eliminados os dois valores mais elevados e os dois mais baixos, procedendo-se posteriormente à determinação da média dos restantes valores. Na realização do ensaio para as rochas anisotrópicas deve ter-se em atenção a orientação dos planos estruturais que o material rochoso apresenta.

Os provetes devem ser ensaiados quer na direção normal (perpendicular), quer na direção paralela a esses planos de anisotropia. Desta forma a relação entre as duas resistências, permite obter um índice de anisotropia (I_a) (expressão 7).

$$I_{a(50)} = \frac{I_{s(50)\perp}}{I_{s(50)\parallel}} \quad (7)$$

Na qual $I_{a(50)}$ é o índice de anisotropia.

Os valores obtidos neste ensaio permitem definir uma estimativa da resistência à compressão uniaxial (ou simples) do material rochoso estudado, os valores desta última podem ser classificados como extremamente brandos a extremamente duros, como se pode verificar na Tabela 3.5.

Geralmente o resultado final obtido é correlacionado com o valor da resistência à compressão uniaxial (RCU) através duma relação linear proposta por Bieniawski (1975) (expressão 8).

$$RCU = a I_{s(50)} \quad (8)$$

Os valores mais frequentes de a estão compreendidos entre 20 e 25.

Tabela 3.5 - Classificação do material rochoso intacto, adaptado de Bieniawski (1979).

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

(-)-> Não são consideradas fiáveis as correlações com a resistência à compressão simples.

3.5. Ensaio de desgaste em meio húmido

O ensaio de desgaste em meio húmido (“*Slake Durability Test*”) tem de sido utilizado para e estudar o comportamento dos materiais rochosos relativamente à sua resistência ao

desgaste e desagregação em meio aquoso e processos de secagem. A durabilidade de um material rochoso corresponde à resistência desse material a um processo de alteração ou deterioração no decorrer de um intervalo de tempo.

Procurou-se com a execução deste ensaio caracterizar a durabilidade tendo em atenção o grau de alteração dos calcários dolomíticos estudados.

Franklin & Chandra (1972) procederam ao desenvolvimento do ensaio de desgaste em meio húmido. Gamble (1971) recomendou a realização de um segundo ciclo de desgaste após a secagem do material ensaiado.

Durante o ensaio verifica-se a desagregação e a desintegração das partículas do material rochoso, bem como a ocorrência de fissuras e fraturas através da interação entre o material rochoso e a água (Santi, 1998). Através do ensaio de desgaste em meio húmido podemos definir a suscetibilidade à alteração de um determinado material rochoso, especialmente do material rochoso brando (Andrade, 2004). A composição mineralógica e as propriedades físicas e mecânicas dos materiais rochosos condicionam as suas taxas de deterioração.

O “*slake durability test*” é um ensaio simples de se efetuar visto não necessitar de uma preparação demorada dos provetes, sendo mais expedito do que outros ensaios de desgaste (ensaio de Los Angeles e ensaio de Micro-Deval). Tem também a vantagem de não necessitar de grandes quantidades de material, e permitir adaptações quer em relação às condições de utilização do material, quer em relação às suas próprias características.

3.5.1. Metodologia

Os ensaios de desgaste em meio húmido foram efetuados de acordo com as recomendações da ISRM (1981). Nestes ensaios utilizam-se 450 a 550 gramas de rocha dividido em dez pedaços, em que um destes tem um peso entre 40 a 60 gramas. Os dois tambores que são incorporados no aparelho possuem um diâmetro de 140 mm e são constituídos por uma malha com abertura de 2,0 mm (Figura 3.10). As amostras de material rochoso previamente secas, numa estufa a 105 °C durante 24 horas, são colocadas no interior dos tambores, 5 pedaços em cada, de modo a serem sujeitas a ciclos de humedecimento.



Figura 3.10– Equipamento utilizado no ensaio de desgaste em meio húmido.

Os tambores, já com as amostras no seu interior devidamente pesadas e secas, são então colocados em recipientes com água natural e sujeitos a um movimento de 20 rotações por minuto durante dez minutos, após o qual, as amostras de material rochoso são retiradas dos tambores e submetidas novamente à secagem em estufa a 105 °C, durante 24 horas. Neste trabalho para além dos 2 ciclos de secagem e humedecimento normalizados, realizou-se um 3º ciclo com o mesmo tempo e rotações dos dois primeiros ciclos.

O valor do índice de durabilidade (Id) corresponde à relação em termos percentuais entre a massa do material rochoso seco após cada ciclo e a massa do material rochoso seco inicial.

Na Tabela 3.6 pode observar-se a classificação definida por Aufmuth (1974) para os provetes após o 1º ciclo e na Tabela 3.7 pode verificar-se a classificação de Gamble (1971) utilizada para os provetes após o 2º ciclo.

Tabela 3.6 - Classificação de Aufmuth (1974), tendo atenção os resultados do 1º ciclo.

Categoria	Descrição
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 3.7 - Classificação de Gamble (1971) para o Índice de durabilidade relativo ao 2º ciclo.

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

3.6. Ensaio de resistência à compressão uniaxial

A resistência à compressão uniaxial é o ensaio mecânico mais comum, permitindo obter de uma forma simples a resistência do material rochoso, que no decorrer do ensaio é submetido a uma carga axial.

No estudo do comportamento mecânico dos materiais rochosos é importante entender como se processa o fenómeno de rotura.

A temperatura, o teor de água e a anisotropia dos provetes são fatores que condicionam de forma determinante a resistência da rocha. O aumento da temperatura e do teor em água para níveis próximos dos da saturação provocam a diminuição da resistência, aumentando a ductilidade do material na região pós - pico (Hudson e Harrison, 1997), pelo que se deve sempre ter em consideração estes dois fatores quando se indica um determinado valor de resistência do material rochoso.

A anisotropia do provete é um fator intrínseco da rocha, pelo que não deve ser subestimado e pode originar grandes variações de quase a totalidade das suas propriedades. Esta anisotropia pode ter uma origem primária, ou seja ser gerada aquando dos processos de formação do material rochoso, ou secundária neste caso relacionada com fenómenos exteriores ao processo de formação e passado um tempo considerável após a sua génese, podendo dar-se como exemplo a atuação das forças tectónicas. De acordo com Douglas & Voight (1969) na natureza não ocorrem rochas verdadeiramente isotrópicas, existindo variações apreciáveis de acordo com a escala considerada. Não deve ser esquecido que com a alteração da rocha, os planos de anisotropia, são muitas vezes os principais planos de fraqueza, causando uma diminuição dos parâmetros mecânicos, mas também físicos, e a modificação das características químicas e petrográficas do material.

Os ensaios foram realizados de acordo com os procedimentos sugeridos pela ISRM (1981).

Para a execução do ensaio recomenda-se, para os provetes, uma relação L/D (L - comprimento; D – diâmetro) entre 2 e 3, de modo a evitar que a distribuição das tensões no decorrer do ensaio condicione a resistência da amostra. Os provetes não devem ter um diâmetro inferior a 54 mm. O diâmetro da amostra deverá ser pelo menos 10 vezes maior do que grão de maiores dimensões do material rochoso. O número provetes a ensaiar deve ser no mínimo igual a cinco. A velocidade de aplicação da carga, durante o ensaio, é definida de modo a que a rotura de cada provete decorra após 5 a 10 minutos do início ensaio ou que se proceda à execução do ensaio a uma taxa de carregamento entre 0,5 a 1 MPa.s⁻¹ (ISRM, 1981).

A tensão correspondente à resistência à compressão uniaxial da amostra é calculada através da divisão força máxima obtida durante ensaio pela área inicial do provete, como se demonstra na expressão 9:

$$RCU = \frac{F}{A} \quad (9)$$

Onde: RCU – resistência à compressão uniaxial;

F - é força aplicada;

A - área da base do provete.

3.7. Ensaio de Módulo de Elasticidade

3.7.1. Módulo de elasticidade dinâmico

As propriedades elásticas das rochas são determinadas por um lado pela elasticidade dos minerais que as compõem e por outro lado pela importância e pela morfologia das discontinuidades, nomeadamente fissuras e fraturas.

Os ensaios para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico foram efetuados obedecendo às recomendações da ISRM (1977). De acordo com os métodos descritos no Capítulo 3.1 procede-se à determinação da velocidade de propagação das ondas longitudinais (V_p) e as ondas transversais (V_s) dos provetes, que variam de modo significativo com a existência de discontinuidades. A partir destes valores é possível definir as características elásticas dinâmicas. O coeficiente de *Poisson* dinâmico (ν_d) é calculado a partir expressão 10 obtida pelo *software* do *Pundit Lab da Proceq* (2010).

$$\nu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (10)$$

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) pode ser obtido pela expressão 11 também obtida pelo *software* do *Pundit Lab da Proceq* (2010).

$$E_d = 2\rho V_s^2(1 - \nu) \quad (11)$$

Onde: ρ é a massa volúmica

3.7.2. Módulo de elasticidade estático

A rotura, numa prensa rígida, depende da rigidez relativa da máquina utilizada no ensaio (Hudson *et al.*, 1972) e das características particulares do material que constitui o provete. O processo de rotura é estável quando é necessário fornecer energia ao provete para que a rotura prossiga, e instável quando é necessário subtrair energia para evitar o colapso violento dos provetes (Ferrer, 1986). A máquina faz-se atuar o fluido hidráulico sobre ambas as faces do pistão que vai aplicar ou remover carga ao provete, de forma que se obtenha uma velocidade de deslocamento constante. Para evitar a rotura explosiva da amostra o sistema deverá ter um tempo de resposta muito curto, mantendo a velocidade de deformação constante.

A ISRM (1981, 1999) sugeriu o método para a obtenção da curva completa de tensão-deformação em compressão uniaxial. Além de propor definitivamente a utilização de máquinas servo – controladas, sugere os principais procedimentos: a placa superior da prensa deve ser munida de uma base esférica que permita reduzir o efeito do não paralelismo dos provetes. Os sistemas de medição axial *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) ou extensómetros elétricos deverão ser no mínimo dois e a sua colocação é efetuada diretamente nas paredes do provete a 25 e 75% da altura e a 180° um do outro. As medições laterais devem ser efetuadas através da colocação de extensómetros a meia altura do provete. A relação altura-diâmetro dos provetes deve estar compreendida entre 2 e 3.

3.7.2.1. Tratamento de resultados

De acordo com as recomendações da ISRM (1999), com o registo das várias leituras efetuadas com os extensómetros e da célula de carga da máquina foi possível obter a tensão à compressão uniaxial já obtida na expressão 9.

A deformação axial (ϵ_a) é definida pela equação 12:

$$\epsilon_a = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (12)$$

Sendo Δl a variação do comprimento do provete (sendo positiva se a variação corresponder a uma diminuição do comprimento) e l_0 o comprimento inicial do provete antes de ser sujeito a carregamento.

A deformação diametral (ε_d), que é apresentada na expressão 13, foi determinada através da variação do diâmetro do provete e utilizando um extensómetro colocado numa disposição transversal e a meia altura do provete.

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d_0} \quad (13)$$

A deformação diametral numa dada direção foi obtida considerando o d_0 como o diâmetro inicial do provete nessa direção, e Δd a sua variação (negativa para um aumento de diâmetro).

Para o cálculo da tensão à compressão uniaxial e para a determinação dos parâmetros estáticos do módulo de *Young* (E) seguiram-se as recomendações da ISRM (1981), que também foram utilizadas para definir o valor de E através de diferentes métodos que permitem encontrar o módulo de deformabilidade tangente, secante e médio.

$$E = \frac{\Delta RCU}{\Delta \varepsilon} \quad (14)$$

O coeficiente de *Poisson* (ν) foi determinado, para valores de deformação correspondentes a 33 % da tensão máxima segundo a equação 15:

$$\nu = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_a} \quad (15)$$

4. CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA ROCK MASS RATING

A classificação Geomecânica designada *Rock Mass Rating* (RMR) (Tabela 4.1) foi introduzida e desenvolvida por Bieniawski (1979, 1989), as suas primeiras aplicações foram em maciços rochosos subterrâneos, designadamente para túneis. Esta classificação está relacionada com atribuição de pesos a parâmetros relacionados com as características físicas, geométricas e mecânicas do maciço e do material rochoso:

- Resistência do material rochoso à compressão uniaxial e pontual;
- Grau de fracturação em termos de *Rock Quality Designation* (RQD);
- Espaçamento das descontinuidades;
- Condições das descontinuidades (rugosidade, continuidade, abertura, preenchimento e alteração das paredes das descontinuidades);
- Condições hidrogeológicas (infiltração de água);
- Orientação das descontinuidades em relação a escavação.

A partir dos pesos atribuídos aos seis parâmetros em cima mencionados, em função das suas características, procede-se à classificação do maciço rochoso pelo somatório dos valores determinados, obtendo-se assim o Índice de Qualidade RMR para cada zona geotécnica de um dado maciço, variando este valor entre 0 a 100.

Tabela 4.1 – Sistema de Classificação Geomecânica de RMR (adaptado de Bieniawski (1989)).

Parâmetros de Classificação		Coeficientes							
1	Resistência do material rochoso intacto	Ensaio de resistência à carga pontual (MPa)	> 10	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Para este intervalo é preferível utilizar os resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial (MPa)		
		Resistência à compressão simples (MPa)	> 250 MPa	100 – 250 MPa	50 – 100 MPa	25 – 50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Peso	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD	90 - 100 %	75 – 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	< 25 %			
	Pesos	20	17	13	8	3			
3	Espaçamento das descontinuidades	> 2 m	2,0 – 0,6 m	60 – 20 cm	20 – 6 cm	< 60 mm			
	Peso	20	15	10	8	5			
4	Características das descontinuidades (ver E)	Superfícies muito rugosas Não contínuas Nenhuma separação Superfície de rocha inalterada	Superfícies ligeiramente rugosas Separação <1 mm Superfície de rocha ligeira/alterada	Superfícies ligeiramente rugosas Separação <1 mm Superfície de rocha muito alterada	Superfícies lisas ou enchimento com espessura < 5 mm ou separação 1-5 mm contínua	enchimento mole com espessura >5 mm ou separação >5 mm contínua			
	Peso	30	25	20	10	0			
5	Presença de água (Condições gerais)	Seco	Ligeiramente húmido	Húmido	Gotejando	Fluente			
	Peso	15	10	7	4	0			
E. Guia para a classificação das condições das descontinuidades (parâmetro A.4)									
Comprimento das descontinuidades (persistência)		< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m			
Peso relativo		6	4	2	1	0			
Separação das descontinuidades (abertura média)		Nenhuma	< 0,1 mm	0,1-1,0 mm	1-5 mm	> 5 mm			
Peso relativo		6	5	4	1	0			
Rugosidade		Muito rugosas	Rugosas	Ligeiramente rugosas	Aplanadas	Estriadas			
Peso relativo		6	5	3	1	0			
Material de preenchimento das descontinuidades		Ausência de preenchimento	Com material duro < 5 mm	Com material duro > 5 mm	c/ material brando < 5 mm	c/ material brando > 5 mm			
Peso relativo		6	4	2	2	0			
Estado de alteração das superfícies das descontinuidades		Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Decompostas			
Peso relativo		6	5	3	1	0			

O parâmetro 6 descrito na Tabela 4.2, é referente à orientação das descontinuidades e permite efetuar a correção dos valores do RMR de maciços rochosos, onde se pretendem implementar obras de engenharia como túneis, fundações e taludes.

Tabela 4.2 – Continuação da classificação Geomecânica de RMR com efeito da orientação das descontinuidades (adaptado de Bieniawski (1989)).

6 - Efeito da orientação e do pendor das fraturas em relação ao avanço da escavação						
Direção “perpendicular” ao eixo do túnel			Direção “paralela” ao eixo do túnel			
Avanço a favor do pendor - Pendor entre 45-90°		Avanço a favor do pendor - Pendor entre 20-45°	Pendor entre 45-90°		Pendor entre 20-45°	
Muito favorável		Favorável	Muito desfavorável		Razoável	
Avanço contra o pendor - Pendor entre 45-90°		Avanço contra o pendor - Pendor entre 20-45°	Pendor entre 0-20° independentemente da direção da fracturação			
Razoável		Desfavorável	Razoável			
Reajustamento dos pesos em função da orientação das descontinuidades						
Direção e pendor das fraturas		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Na Figura 4.1 é demonstrado o tipo de avanço da escavação em função da orientação descontinuidades.

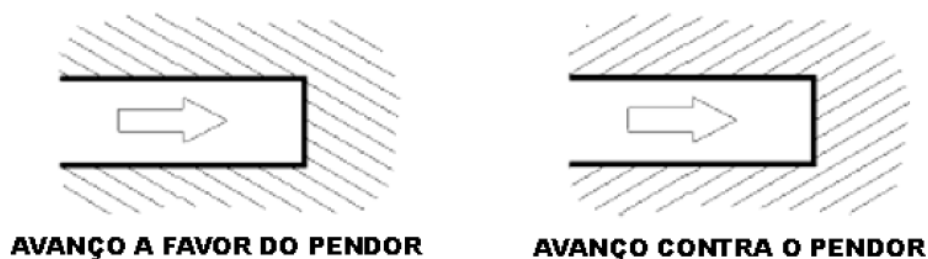


Figura 4.1 – Esquema representativo do tipo de avanço da escavação (Wickham *et al.*, 1974 in Figueiredo 2012).

A Tabela 4.3 apresenta as classes do maciço rochoso referentes ao valor de RMR calculado. São consideradas cinco classes, com o aumento do valor do Índice RMR, melhor é a qualidade do maciço rochoso, e mais elevados se apresentam os seus valores da coesão e do ângulo de atrito do maciço rochoso.

Tabela 4.3 – Classificação do maciço rochoso (adaptado de Bieniawski (1989)).

CLASSES DOS MACIÇOS					
Peso Total	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21
Número da classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Maciço muito bom	Maciço bom	Maciço regular	Maciço pobre	Maciço muito pobre
SIGNIFICADO DAS CLASSES					
Número da Classe	I	II	III	IV	V
Tempo médio de estabilidade de vão sem suporte	20 anos para 15 m de vão	1 ano para 10 m de vão	1 semana para 5 m de vão	10 horas para 2,5 m de vão	30 minutos para 1 m de vão
Coesão da massa rochosa	> 400 kPa	300-400 kPa	200-300 kPa	100-200 kPa	< 100 kPa
Ângulo de atrito da massa rochosa	> 45°	35-45°	25-35°	15-25°	< 15°

4.1. Resistência do material rochoso

A resistência do material rochoso pode ser obtida através do ensaio laboratorial de resistência à compressão uniaxial em amostras devidamente preparadas ou, em alternativa, através do ensaio de resistência à carga pontual (*Point Load Test*) já que, para efeitos de classificação de maciços, este ensaio fornece uma estimativa satisfatória daquele valor, pode ainda ter-se uma ideia aproximada da resistência do material rochoso pela realização de ensaios de determinação da dureza através do esclerómetro do tipo de martelo de Schmidt, que constitui um ensaio rápido e não destrutivo, apesar do seu grau elevado de incerteza.

Estes ensaios encontram-se descritos nos subcapítulos 3.3, 3.4 e 3.6, respetivamente o esclerómetro do tipo de martelo de Schmidt, a resistência à carga pontual e a resistência a compressão uniaxial.

4.2. *Rock Quality Designation (RQD)*

O índice RQD (*Rock Quality Designation*) é um sistema de classificação, desenvolvido por Deere (1967), e que está relacionado com a qualidade dos maciços rochosos. O RQD é estabelecido através do estudo dos testemunhos de sondagens. Este índice é calculado com base na expressão 16:

$$RQD (\%) = \frac{\sum l_i (>10cm)}{L} \times 100 \quad (16)$$

Onde: $\sum l_i (>10 \text{ cm})$ - somatório do comprimento dos tarolos que apresentam com uma extensão longitudinal superior a 10 cm

L - comprimento total que é furado em cada manobra de uma sondagem.

As classes propostas por Deere (1967) para definir a qualidade dos maciços rochosos em função do valor do RQD obtido são apresentadas na Tabela 4.4

Tabela 4.4 - Qualidade do maciço rochoso em função do índice RQD, adaptação de Deere (1967).

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

4.3. Espaçamento das descontinuidades

Denomina-se espaçamento ao afastamento médio entre descontinuidades, sendo este medido segundo a normal aos seus planos. Para cada família, o espaçamento entre as descontinuidades será calculado por subtração das distâncias à origem da fita graduada.

O espaçamento das descontinuidades, especialmente no caso das diáclases, condiciona (ISRM, 1978, 1981): o tamanho individual dos blocos; pode modificar as condições favoráveis para uma rotura do tipo planar para as da rotura circular. O espaçamento das descontinuidades em conjunto com a presença de várias famílias, condicionam de modo determinante a permeabilidade do maciço, bem como as suas características de percolação.

Como se pode observar na Tabela 4.5, a ISRM (1978, 1981) propõe que seja utilizada uma terminologia para caracterizar os maciços em função do espaçamento das descontinuidades.

Tabela 4.5 - Terminologia para caracterizar os maciços de acordo com o espaçamento das descontinuidades segundo a ISRM (1978, 1981).

Intervalos (cm)	Simbologia		Designações	
> 200	F ₁	F ₁₋₂	Muito afastadas	Muito afastadas
60-200	F ₂		Afastadas	
20-60	F ₃	F ₃	Medianamente afastadas	Medianamente afastadas
6-20	F ₄	F ₄₋₅	Próximas	Próximas
< 6	F ₅		Muito próximas	

4.4. Condições das descontinuidades

No parâmetro relativo às condições das descontinuidades distinguem-se cinco itens, sendo eles:

1. Grau de alteração
2. Comprimento da descontinuidade (persistência);
3. Separação (abertura);
4. Rugosidade;
5. Enchimento;

1. Grau de alteração

O estado de alteração de um maciço rochoso é um fator que se deve ter em conta. Este é definido quantitativamente, tendo em conta a medição de parâmetros tais como, a resistência da rocha, a velocidade de propagação de ultrassons ou outros. Na Tabela 4.6 estão descritos os 5 graus de alteração propostos pela ISRM (1981).

Tabela 4.6 - Graus de alteração considerados pela ISRM (1981).

Simbologia	Designação	Descrição
W1	São ou não alteradas	Não se verificam sinais de alteração da matriz rochosa
W2	Ligeiramente alterada	Sinais de alteração apenas nas superfícies das discontinuidades
W3	Moderadamente alterada	Alteração visível em todo o maciço rochoso mas a maior parte do material rochoso não é friável
W4	Muito alterada	Alteração visível em todo o maciço e a maior parte do material rochoso é friável
W5	Completamente alterada	Todo o material rochoso está muito decomposto e/ou desagregado num solo residual.

2. Comprimento da descontinuidade (persistência)

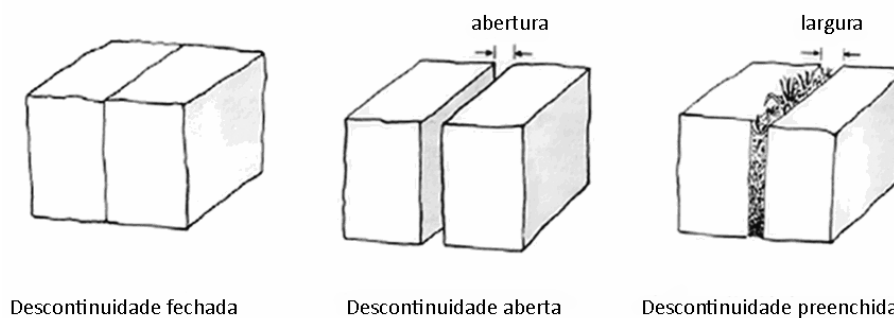
O comprimento da descontinuidade designa-se por continuidade ou persistência. Esta é obtida por vezes através da medição do traço da descontinuidade no plano de observação. As medições devem ser individualizadas por famílias e seguidamente deve ser efetuado um tratamento estatístico. Obtido através da observação de afloramentos, é um parâmetro de grande importância e de quantificação difícil. A medição da continuidade executa-se mediante a utilização de uma fita métrica. Como as descontinuidades condicionam, de modo geral, os planos de rotura do maciço rochoso, é importante destacar as famílias de maior continuidade. A persistência pode ser classificada em cinco termos (ISRM 1978, 1981), como se pode observar na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Descrição da continuidade das descontinuidades (ISRM, 1981).

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

3. Separação (abertura)

A abertura é definida como a distância medida entre duas paredes de uma descontinuidade, sendo esta medição efetuada perpendicularmente a essas superfícies (Figura 4.2).

**Figura 4.2** - Ilustrações relativas a abertura das descontinuidades (adaptado de ISRM, 1978).

Caraterísticas como a deformabilidade, permeabilidade e resistência ao corte dos maciços rochosos são condicionadas de modo importante pela abertura das descontinuidades. Este parâmetro pode apresentar-se muito variável em diferentes zonas de um mesmo maciço rochoso. A abertura pode ser elevada à superfície, enquanto em profundidade tenderá a diminuir, podendo verificar-se que as descontinuidades se apresentem fechadas. A influência da abertura na resistência ao corte das descontinuidades é importante, dado que altera as tensões existentes ao longo das paredes. A medição da abertura é determinada através de leituras com uma régua graduada (em milímetros).

Para definir a abertura das descontinuidades, considerou-se a classificação RMR (1989). Na Tabela 4.8 é descrita a classificação da abertura das descontinuidades, sendo cada família estudada individualmente e caracterizada pelo valor médio das aberturas (ISRM 1978, 1981), que apresenta intervalos diferentes da classificação RMR.

Tabela 4.8 – Classificação as abertura das descontinuidades (adaptado de ISRM, 1978, 1981).

Aberturas (mm)	Descrição	
< 0,1	Muito Apertadas	Fechada
0,1-0,25	Apertada	
0,25-0,5	Parcialmente aberta	
0,5-2,5	Aberta	Aberta
2,5-10	Razoavelmente larga	
> 10	Larga	
10-100	Muito larga	Muito aberta
100-1000	Extremamente larga	
> 1000	Cavernosa	

4. Rugosidade

De modo geral, a superfícies das descontinuidades evidencia irregularidades, as quais são designadas, de modo genérico, como rugosidade. Este parâmetro influencia de modo determinante a resistência ao corte do maciço, sendo assim quanto maior for a rugosidade maior será a resistência.

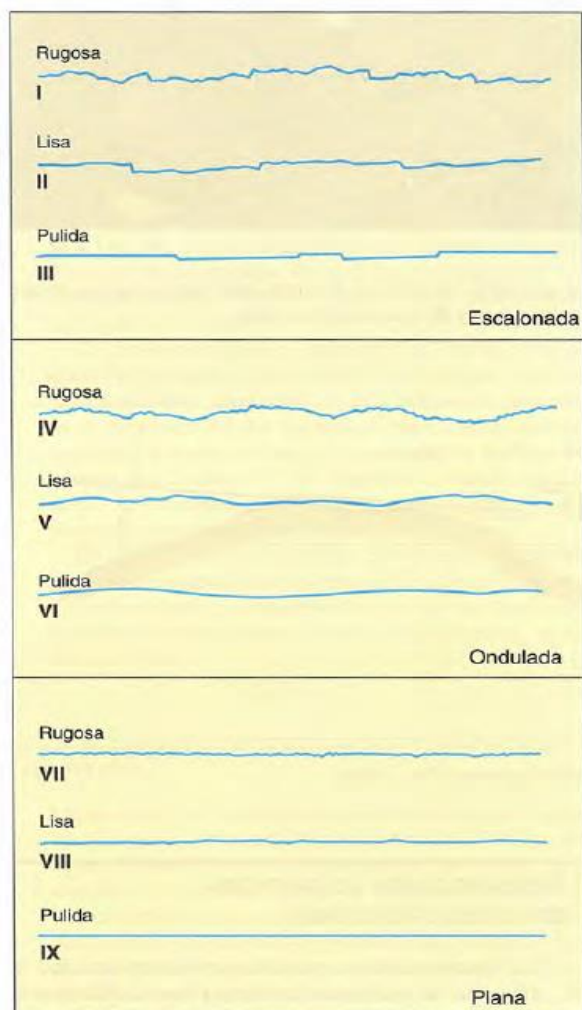
A ISRM (1978, 1981) propôs que a superfície das descontinuidades fosse classificada em três grupos: denteada, ondulada e plana.

A rugosidade pode ser determinada no campo a partir da comparação visual das superfícies das descontinuidades com perfis tipo de rugosidade. As superfícies de descontinuidades podem ser classificadas como denteada, ondulada ou plana, podendo ainda ser subdivididas em três subclasses: rugosa, lisa e estriada (ISRM 1978, 1981).

Na Tabela 4.9 pode observar-se a classificação da rugosidade das descontinuidades e na Figura 4.3 os perfis de rugosidade.

Tabela 4.9 - Classificação da rugosidade das discontinuidades (adaptado da ISRM, 1981).

Classe	Descrição	Designação (R)	Forma de perfil
I	Rugosa	R ₁₋₂ Pouco Rugosa	Denteada
II	Lisa		
III	Estriada		
IV	Rugosa	R ₃ Medianamente rugosa	Ondulada
V	Lisa		
VI	Estriada		
VII	Rugosa	R ₄₋₅ Muito rugosa	Plana
VIII	Lisa		
IX	Estriada		

**Figura 4.3** - Perfis de rugosidade (ISRM, 1981 in Vallejo *et al.*, 2002).

Para definir-se a rugosidade das discontinuidades, adaptou-se a classificação RMR (1989), sendo que na Tabela 4.9, observar-se a classificação proposta pela ISRM (1981), que apresenta escalas diferentes da classificação da rugosidade considerada pela classificação RMR.

5. Enchimento

O enchimento é todo o material que existe entre as paredes de uma discontinuidade. O preenchimento das discontinuidades pode ser formado por materiais brandos argilosos ou com material rochoso de natureza diferente das suas paredes. O comportamento das discontinuidades preenchidas pode ser muito variável e é controlado pelas propriedades físicas e mecânicas do material do preenchimento, como a resistência ao corte, a deformabilidade e a permeabilidade.

4.5. Presença de água

A percolação de água num maciço rochoso está principalmente relacionada com o fluxo de água que circula pela rede de discontinuidades. Nos maciços rochosos de origem sedimentar a permeabilidade primária do material rocha pode ser importante, uma vez que uma parte da percolação se verifica ao longo dos vazios da rocha. As situações de instabilidade e os problemas de construção nas obras de engenharia estão relacionados com a percolação da água, a profundidade do nível freático e a pressão da água.

4.6. Orientação das discontinuidades

A atitude geológica de uma discontinuidade é obtida através da sua direção e inclinação, esta medição é efetuada com recurso à “bússola de geólogo”.

A direção de uma discontinuidade é o ângulo que uma linha horizontal do plano correspondente à discontinuidade define com o Norte magnético, enquanto a inclinação é o ângulo que a reta de maior inclinação do plano e perpendicular à direção, define com o plano horizontal (Figura 4.4).

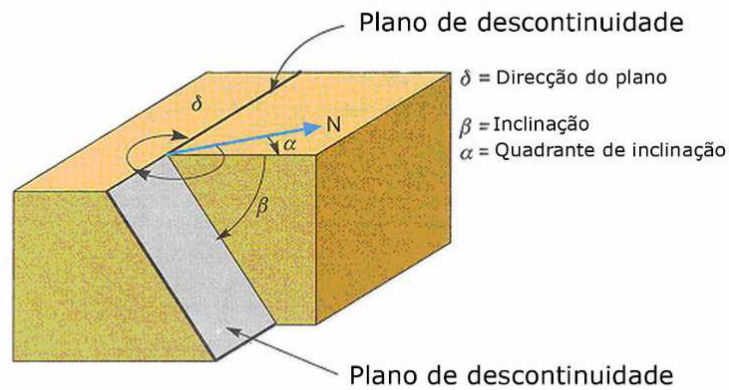


Figura 4.4 - Atitude geológica de uma descontinuidade (adaptado Vallejo *et al.*, 2002).

No decorrer de um estudo de um maciço rochoso deve proceder-se à definição de um número significativo de descontinuidades para definir cada família. O número de medições a efetuar está relacionada com a dimensão da zona a estudar, assim como pela aleatoriedade das orientações dos planos.

5. RESULTADOS DOS ENSAIOS LABORATORIAIS

Para a finalidade deste trabalho impõe-se conhecer as características físicas e mecânicas do material calcário dolomítico estudado. É com base nas características físicas e na observação visual que se classificam os materiais rochosos em função do grau de alteração (ver Tabela 4.9 no Capítulo 4.4).

Como se pretendia caracterizar o material rochoso nos vários graus de alteração existentes no terreno e relacionar os seus parâmetros físicos e mecânicos através da obtenção das melhores correlações, optou-se por efetuar os ensaios de caracterização física diretamente nos provetes onde mais tarde foram realizados os ensaios de caracterização mecânica e durabilidade.

Atendeu-se às recomendações da ISRM (1981, 1999) sobre a relação entre o diâmetro e a largura e a dimensão dos grãos minerais para a realização dos ensaios mecânicos. Com estas metodologias os parâmetros mecânicos são facilmente relacionáveis com as características físicas, uma vez que foram determinados ambos os parâmetros para o mesmo material.

5.1. Amostragem e preparação dos provetes

Relativamente à amostragem foram escolhidos provetes das várias sondagens disponíveis de modo a conseguir-se obter amostras representativas dos vários estados de alteração (W1,W2 e W3). Os provetes cilíndricos foram obtidos através de sondagens mecânicas, e têm 50 e 70 mm de diâmetro. Os provetes foram submetidos ao corte dos seus topos em laboratório, utilizando uma serra elétrica de disco diamantado. Esta tarefa teve de ser realizada com algum cuidado devido à facilidade com que os materiais se esboroavam e partiam inutilizando o provete, principalmente para os provetes do tipo W3.

No final deste processo obtiveram-se 85 provetes com um comprimento que varia entre 65 a 188 mm, de modo a obter uma relação comprimento/diâmetro entre 1 e 3. Esta relação varia consoante o ensaio mecânico a realizar: ensaio de carga pontual no Capítulo 5.1.4, ensaio de compressão uniaxial no Capítulo 5.1.6 e ensaio de módulo de deformabilidade estático no Capítulo 5.1.7.2.

5.1.1. Ensaio de velocidade de propagação das ondas sísmicas (ultra-sons)

Como já foi referido no Capítulo 3.1 a velocidade de propagação dos ultra-sons é um parâmetro importante para a caracterização física dos materiais rochosos. A velocidade de propagação das ondas longitudinais também é utilizada no cálculo dos módulos de elasticidade dinâmicos e do coeficiente de *Poisson* dinâmico de rochas, valores que são determinados no Capítulo 5.1.7.1.

No início do ensaio deve seguir-se os procedimentos de calibração recomendados pelo construtor do equipamento.

No presente trabalho foram realizados ensaios de contacto para transmitir as ondas longitudinais (V_p) e transversais (V_s) nos provetes, estes contêm um teor de água resultante de secagem à temperatura ambiente. Foram efetuados três ensaios para cada provete com três transdutores de contacto diferentes, onde dois deles são utilizados para a determinação das ondas V_p (24 e 54 kHz) e o outro é empregue para as ondas V_s (250 kHz). O material acoplante foi a vaselina pela sua facilidade de aplicação e baixo custo para os transdutores de 24 e 54 kHz e uma massa de acoplamento para os transdutores de 250 kHz, utilizados na determinação das V_s . Neste ensaio foram ensaiados 85 provetes, sendo 33 com um estado de alteração W1, 28 de W2 e 24 de W3.

De referir que a determinação destas velocidades nos provetes de rocha mais alterada ofereceu alguma dificuldade devido à existência de superfícies rugosas com muitos vazios, que dificultou o acoplamento entre o provete, os recetores e os emissores do impulso.

Na Tabela 5.1 apresentam-se as médias dos resultados obtidos da medição da velocidade de propagação das ondas de ultra-sons em função do grau de alteração. No ANEXO I encontram-se a totalidade dos ensaios realizados.

Como se pode verificar com o aumento do grau de alteração da rocha, existe uma diminuição da velocidade de propagação dos ultra-sons.

Tabela 5.1 – Resumo dos resultados obtidos na determinação das velocidades de propagação das ondas dos ultra-sons.

		Velocidades das ondas P ($m.s^{-1}$)			Velocidades das ondas S ($m.s^{-1}$)
		24 kHz	54 kHz	Média	250 kHz
W1	Média	3444	3726	3661	2213
	Desvio Padrão	661	623	634	327
	Mínimo	2198	2292	2245	1565
	Máximo	4821	4932	4877	3000
W2	Média	3481	3621	3551	2004
	Desvio Padrão	742	706	722	442
	Mínimo	2363	2532	2448	1232
	Máximo	5097	5197	5141	2860
W3	Média	3144	3285	3214	1657
	Desvio Padrão	738	724	730	634
	Mínimo	2280	2448	2364	750
	Máximo	5302	5302	5302	2821

De acordo com a classificação da IAEG (1979) (Tabela 3.1 no Capítulo 3.1) classificou-se a velocidade de propagação das ondas longitudinais para os calcários dolomíticos de alteração W1 e W2 como média e para o W3 como baixa.

5.1.2. Determinação da massa volúmica aparente e porosidade aberta

Na determinação da massa volúmica aparente e porosidade seguiram-se os procedimentos descritos no Capítulo 3.5 e de acordo com a norma CEN (1997).

Para este trabalho foram efetuadas duas séries de 8 provetes para cada um dos três tipos de grau de alteração (W1, W2 e W3).

Na Tabela 5.2 apresentam-se os resultados da variação média entre as duas séries em função do grau de alteração para a massa volúmica aparente, a porosidade aberta e os respetivos desvios padrões.

Tabela 5.2 – Resultados obtidos na determinação da massa volúmica aparente e da porosidade aberta em função do grau de alteração.

Estado de alteração	Massa volúmica aparente (kg.m ⁻³)	Desvio Padrão (kg.m ⁻³)	Porosidade (%)	Desvio Padrão (%)
W1	2456,4 - 2473,0	82,9 - 86,7	13,4 - 13,8	3,1 - 3,2
W2	2323,8 - 2296,5	157,0 - 203,0	18,5 - 19,6	5,1 - 7,3
W3	1952,9 - 1954,3	152,0 - 197,5	30,7 - 30,8	5,7 - 7,4

Como se verifica na análise da Tabela 5.2, com o aumento do grau de alteração verifica-se uma relação inversa com a massa volúmica e uma relação direta com a porosidade.

Os provetes de grau de alteração W1, apresentam uma massa volúmica aparente compreendida entre 2456,4 kg.m⁻³ e 2473 kg.m⁻³ e uma porosidade aberta entre 13,43 % e 13,76 %. Os provetes de grau de alteração W2 registaram uma massa volúmica inferior aos W1 compreendida entre 2323,8 kg.m⁻³ e 2296,5 kg.m⁻³ e uma porosidade aberta, superior à registada pelos provetes W1, e compreendida entre 18,5% e 19,6%. Os provetes de grau de alteração W3 possuem uma massa volúmica inferior aos provetes W1 e W2, e que está compreendida entre 1952,9 kg.m⁻³ e 1954,3 kg.m⁻³ e uma porosidade aberta, mais elevada, neste caso entre 30,7 % e 30,8 %.

Segundo a IAEG (1979), pode assumir-se que a classificação da massa volúmica para os calcários W1 e W2 é média, enquanto para os calcários W3 é considerada como baixa; a porosidade aberta para os calcários W1 é definida como média, como elevada para os W2 e muito elevada para os W3.

5.1.3. Determinação da dureza de Schmidt

Relativamente ao ensaio de carga pontual seguiu-se os procedimentos propostos pela ISRM (1981) como descritos no Capítulo 3.3.

Este ensaio foi realizado com um teor de água resultante da secagem ao ar em laboratório.

Neste ensaio foram ensaiados 78 provetes de calcários dolomíticos, sendo 33 de grau de alteração W1, 28 de W2 e 17 de W3 com 50 a 70 mm de diâmetro e 65 a 188 mm de comprimento. Não foi possível realizar o ensaio em 7 provetes dos 85 preparados, uma

vez que estes apresentavam um grau de alteração mais elevado e se deterioravam com o impacto do ressalto do êmbolo do martelo de Schmidt.

Na Tabela 5.3 apresentam-se os resultados da dureza de Schmidt (R) e da correlação da resistência à compressão uniaxial (RCU) obtida a partir do ábaco que se apresenta na Figura 3.5 no Capítulo 3.3, em que consideram-se os valores de R, a massa volúmica do material rochoso testado e a inclinação do aparelho, que neste caso foi vertical no sentido descendente. A massa volúmica foi obtida no Capítulo 5.1.2 e usou-se os valores médios da Tabela 5.2.

Tabela 5.3 – Resultados da dureza de Schmidt e da correlação da resistência à compressão uniaxial.

	W1		W2		W3	
	R	RCU (MPa)	R	RCU (MPa)	R	RCU (MPa)
Média	36,7	58	32,9	46	25,9	29
Desvio Padrão	6,0		7,1		8,0	
Mínimo	26,6	34	16,6	21	13,2	17
Máximo	48,4	105	48	93	39,6	50

Pela análise dos resultados obtidos na Tabela 5.3, verifica-se que a dureza de Schmidt aumenta quanto menor o grau de alteração da rocha. Como também se pode verificar no ábaco (Figura 3.5 no Capítulo 3.3), quanto maior a dureza de Schmidt e a massa volúmica, maior a resistência à compressão uniaxial.

5.1.4. Ensaio de resistência à carga pontual (“point load Strength”)

Relativamente ao ensaio de carga pontual seguiu-se os procedimentos propostos pela ISRM (1985) como foram descritos no Capítulo 3.4.

Estes ensaios foram realizados com um teor de água resultante da secagem ao ar.

Foram realizadas 5 séries de 11 e 12 provetes cada, duas para o estado de alteração W1 e W2 e uma para W3.

Na Tabela 5.4 apresentam-se os resultados já calculados para o $I_{S(50)}$ da medição da resistência à carga pontual.

Tabela 5.4 – Resultado do ensaio de carga pontual em função do grau de alteração.

W1						W2						W3		
1ª Série			2ª Série			1ª Série			2ª Série					
Descrição do provete	Is ₍₅₀₎ (MPa)		Descrição do provete	Is ₍₅₀₎ (MPa)		Descrição do provete	Is ₍₅₀₎ (MPa)		Descrição do provete	Is ₍₅₀₎ (MPa)		Descrição do provete	Is ₍₅₀₎ (MPa)	
	A*	B*		A*	B*		A*	B*		C*	D*		A*	B*
T13B	2,85	2,85	T13B.1	2,73	2,73	T15A	1,42	1,42	T15B	1,66	1,66	T52	0,95	0,95
T17	3,44	3,44	T18C	2,61	2,61	T15C	2,26	2,26	T32	1,42	1,42	T53	0,83	0,83
T19	3,32	3,32	T20	2,61	2,61	T34	1,42	1,42	T35A	1,41	1,41	T62	3,68	
T21B	2,26		T22A	4,51	4,51	T35B	1,38	1,38	T36	1,26		T68	0,93	0,93
T23	2,37	2,37	T25A	1,31		T40	0,38		T40.1	1,54	1,54	T70	0,63	
T26	5,46		T107A	4,51	4,51	T46	2,85	2,85	T47	2,61		T85	0,90	0,90
T107B	4,75	4,75	T110A	5,11		T49A	2,49	2,49	T49B	2,26	2,26	T86	0,83	
T110B	0,69		T111	1,42		T59	1,42	1,42	T80	2,73	2,73	T94	0,96	0,96
T112	3,09	3,09	T122A	8,07		T99A	0,89		T99B	1,35		T96B	1,22	1,22
T122B	5,70		T148	3,92	3,92	T101.1	1,26	1,26	T101.2	1,35	1,35	T98	1,35	
T150	3,02	3,02	T178A	4,82	4,82	T103	3,56		T106	4,51		T130	0,90	0,90
T178B	3,92	3,92	T186	3,47	3,47	T118B	6,17					T131	1,00	1,00
Média	3,41	3,35		3,76	3,65		2,13	1,81		2,01	1,77		1,18	0,96
Desvio Padrão	1,35	0,68		1,78	0,86		1,49	0,58		0,94	0,48		0,77	0,11

*A - Is₍₅₀₎ para os 12 provetes

*B - Is₍₅₀₎ para de 8 provetes (12 menos os 2 valores mais baixos e os 2 mais elevados)

*C - Is₍₅₀₎ para os 11 provetes

*D - Is₍₅₀₎ para de 7 provetes (11 menos os 2 valores mais baixos e os 2 mais elevados)

Como se verifica na análise da Tabela 5.4 os resultados do Is₍₅₀₎ têm uma relação inversa com o aumento do grau de alteração.

Tendo em conta a classificação de Bieniawski (1979) (Tabela 3.5 do Capítulo 3.4), pode classificar-se a resistência do maciço rochoso de elevada para os calcários de grau de alteração W1, moderada para o W2 e branda para os W3.

5.1.5. Ensaio de desgaste em meio húmido

Para definir a durabilidade realizou-se o ensaio de desgaste em meio húmido (“*Slake Durability*”) segundo as recomendações ISRM (1981) descritas no Capítulo 3.5.

Realizou-se este ensaio para os diferentes materiais rochosos em estudo consoante o grau de alteração (W1, W2 e W3), sendo efetuadas duas séries para cada.

Na Figura 5.1 são apresentados os resultados para o ensaio de desgaste em meio húmido. Foram realizados três ciclos e obteve-se a média das duas séries de Id_1 , Id_2 e Id_3 de cada grupo de alteração.

A norma só recomenda a realização de dois ciclos de 10 minutos, mas para uma melhor caracterização do material rochoso foi efetuado um terceiro ciclo.

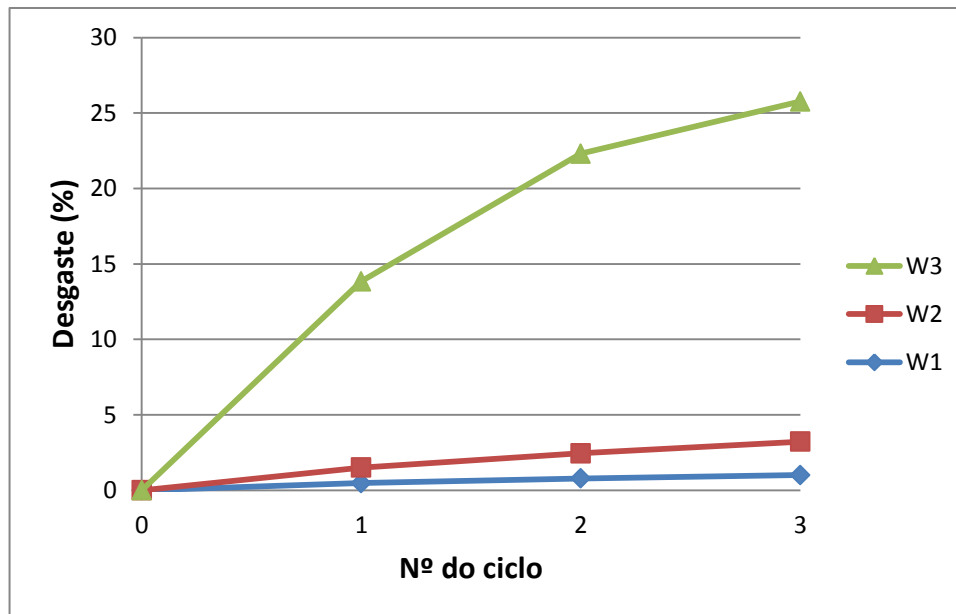


Figura 5.1 – Perdas de material no ensaio de desgaste em meio húmido em função do grau de alteração.

Como se verifica na Figura 5.1 para os grupos de calcário dolomítico W1 e W2, o valor do desgaste é baixo, enquanto para o W3 já se verifica um desgaste bastante considerável, de aproximadamente 25 % para o 3º ciclo.

Tendo em conta a classificação de Aufmuth (1974) descrita na Tabela 3.6 (Capítulo 3.5) para o 1º ciclo pode considerar-se para o grupo W1 uma categoria A, para o W2 uma categoria B e para o W3 uma categoria C.

Segundo a classificação de Gamble (1971) descrita na Tabela 3.7 no Capítulo 3.5, para o 2º ciclo pode considerar-se uma classificação muito alta para os grupos W1 e W2 e uma classificação média para o grupo W3. Para o 3º ciclo considera-se uma classificação muito alta para o grupo W1, alta para o grupo W2 e média alta para o grupo W3.

5.1.6. Resistência à compressão uniaxial

Este ensaio foi realizado numa prensa rígida servo-controlada da *Matest (Servo Plus evolution)* de 2000 kN de força máxima (Figura 5.2), que possui um sistema de ligação no exterior de cinco canais para permitir a acoplagem de outros sistemas de medições

complementares, como por exemplo os extensómetros que vão ser utilizados no ensaio realizado no Capítulo 5.1.7.1.



Figura 5.2 – Prensa rígida servo-controlada utilizada para os ensaios de resistência compressão uniaxial.

Para determinar-se a resistência a compressão uniaxial (*RCU*) os ensaios foram realizados de acordo com os procedimentos sugeridos pela ISRM (1981) descritos no Capítulo 3.6.

Para a realização deste ensaio foram escolhidos 18 provetes aleatórios, sendo 7 de calcários dolomíticos de grau de alteração W1, 5 para W2 e 6 para W3. Os provetes têm um diâmetro de 70 mm e um comprimento compreendido entre 140 a 210 mm, de modo a perfazer uma relação de comprimento e largura entre 2 e 3.

Após o corte das faces dos provetes (Capítulo 5.1) e antes de se retificar os provetes determinou-se a velocidade das ondas dos ultra-sons (Capítulo 5.1.1) e a dureza de Schmidt (Capítulo 5.1.3), por serem estes dois ensaios não destrutivos.

Retificou-se as faces dos provetes, para que ambas fiquem paralelas, usando uma técnica de capeamento composto por uma mistura certificada de enxofre com argilas (Figura 5.3), esta foi aquecida a 130 °C de modo a tornar-se líquida, sendo colocado na base de um molde retificador onde se coloca o provete no vertical paralelo à base. Repete-se o passo anterior para a outra face do provete (Figura 5.4), ficando garantido o paralelismo das faces do provete.



Figura 5.3 – Mistura de enxofre com argilas no estado sólido.



Figura 5.4 – Molde usado para retificação dos provetes, com um dos topos já capeado.

Após a preparação dos provetes, a prensa é configurada para o respetivo ensaio sendo introduzida uma velocidade constante de $0.5 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ e um “*stop load*” de 10 %, ou seja, o ensaio só termina após haver uma quebra de energia igual a 10 % da força exercida no momento. Para cada provete é configurado no sistema a sua forma geométrica e suas dimensões para que o equipamento possa calcular a área e obter, após a rotura do provete, o valor de resistência à compressão uniaxial. No fim de introduzir-se todos os dados necessários à realização do ensaio, o provete é colocado no centro dos pratos e dá-se o início à realização do ensaio (Figura 5.5).



Figura 5.5 - A) Provete antes do ensaio; B) Provete após o ensaio.

Na Tabela 5.5 apresentam-se os resultados obtidos da medição da resistência a compressão uniaxial em função do grau de alteração. Verifica-se com o aumento do grau de alteração da rocha, há uma diminuição da resistência à compressão uniaxial.

Tabela 5.5 – Resultados dos ensaios da resistência á compressão uniaxial em função do grau de alteração.

W1		W2		W3	
Designação do provete	RCU (MPa)	Designação do provete	RCU (MPa)	Designação do provete	RCU (MPa)
T12	40,3	T133A	58,7	T9	11,6
T18B	60,1	T39A	19,0	T54B	17,0
T22B	88,2	T61	19,3	T84	11,4
T22C	69,8	T118A	59,7	T87A	20,2
T25B	77,8	T51	16,5	T133B	29,5
T16B	66,5			T30	23,9
T21A	66,1				
Média	67,0		34,6		18,9
Desvio padrão	13,8		20,1		6,5

Tendo em conta a classificação de Bieniawski (1979) (Tabela 3.5 do Capítulo 3.4), pode classificar-se a resistência do maciço rochoso de elevada para os calcários de grau de alteração W1, moderada para o W2 e branda para os W3.

5.1.7. Ensaio do Módulo de elasticidade

5.1.7.1. Módulo de elasticidade dinâmico

Para este ensaio foram realizados os cálculos para o módulo de deformabilidade dinâmico (E_d) e o coeficiente *Poisson* dinâmico (ν_d) através das expressões 10 e 11 apresentadas no Capítulo 3.7.1. Utilizaram-se as velocidades de propagação das ondas de ultra-sons P e S obtidas no Capítulo 5.1.1 e apresentas no ANEXO I. Também foram usados os valores de massa volúmica médios obtidos no Capítulo 5.1.2 na Tabela 5.2.

Na Tabela 5.6 estão apresentados os resultados dos valores médios para o módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson* dinâmicos para os três graus de alteração obtidos a partir da tabela ANEXO II. Observa-se que com o aumento do grau de alteração há uma diminuição do módulo de elasticidade.

Tabela 5.6 – Resumo dos resultados da determinação do módulo de deformabilidade e coeficiente de *Poisson* dinâmicos para os três graus de alteração.

	W1		W2		W3	
	ν_d	E_d (GPa)	ν_d	E_d (GPa)	ν_d	E_d (GPa)
Média	0,21	19,74	0,28	13,30	0,29	8,83
Desvio padrão	0,08	6,67	0,04	5,93	0,13	6,87
Mínimo	0,04	8,99	0,22	4,70	0,01	1,17
Máximo	0,33	39,92	0,35	27,36	0,47	22,79

Na Figura 5.6 apresenta-se um resumo dos resultados dos módulos de elasticidade dinâmicos determinados. Observa-se com a diminuição do grau de alteração há um aumento médio do módulo de elasticidade e há uma maior variação entre o máximo e mínimo.

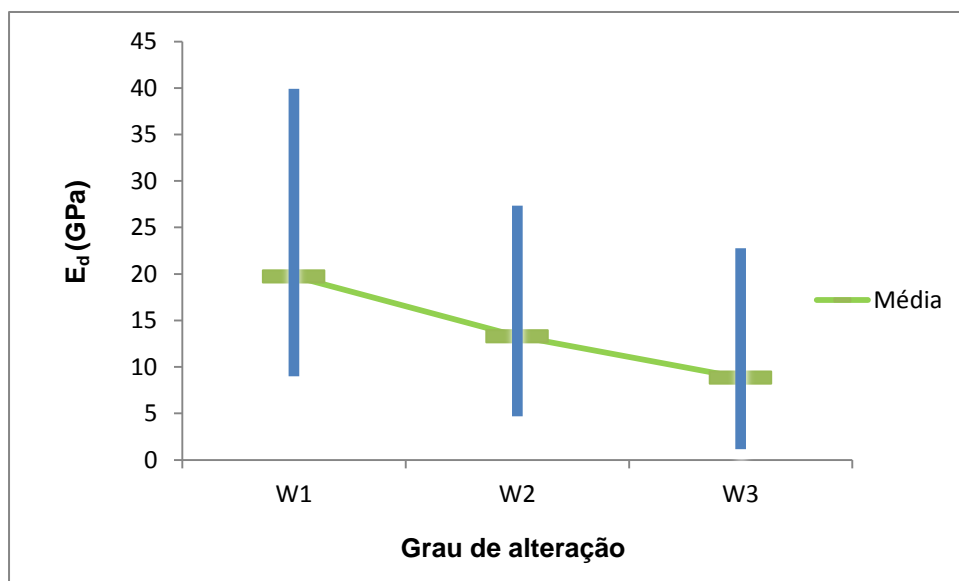


Figura 5.6 - Resumo do ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico com a média, mínimo e máximo para os três graus de alteração.

5.1.7.2. Módulo de elasticidade estático

Para a determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de *Poisson* estáticos, foram implementados equipamentos de medição das deformações axiais e laterais nos provetes submetidos a forças de compressão. A prensa utilizada foi a mesma do que na determinação da resistência a compressão uniaxial (Capítulo 5.1.6), como foi

referido esta máquina permite adicionar outros equipamentos de sistemas de medições complementares.

O sistema de medição utilizado foi os extensómetros elétricos (Strain Gauges) de 90 mm com um fator de $2.10 \pm 1 \%$.

Neste ensaio foram utilizados 6 provetes de 70 mm de diâmetros e 149 a 188 mm de comprimento.

Devido ao ensaio ser dispendioso só foram instrumentados dois provetes para cada grupo de alteração (W1,W2 e W3), a escolha dos provetes teve como principal importância serem os mais representativos possíveis para cada grupo de alteração, para esta escolha teve-se em atenção as velocidades de propagação das ondas dos ultra-sons.

Na preparação dos provetes deste ensaio utilizou-se a mesma metodologia do Capítulo 5.1.6 (corte e capeamento) e efetuados os ensaios não destrutivos (velocidades de ultra-sons e martelo de Schmidt). Após estes processos foram colocados os extensómetros elétricos nos provetes.

Os provetes foram instrumentados com dois extensómetros cada, um na vertical e outro a 90° (na horizontal) para medição das deformações axiais e laterais respetivamente. Os extensómetros foram colados paralelamente e perpendicularmente à direção de aplicação da carga e a metade da altura do provete como se pode observar na Figura 5.7.

Na colagem houve o cuidado da limpeza e secagem do provete para uma maior uniformidade de acoplação do extensómetro à superfície do provete rochoso, uma vez que estes instrumentos são muito sensíveis. A sua colagem não ofereceu problemas nos provetes sãos, mas houve algumas dificuldades na sua colocação nos provetes mais alterados, o que levou a alguns procedimentos extras: como a utilização de uma lixa no local de colagem na parede do provete para a obtenção de uma superfície lisa e sem rugosidades; cobertura desta superfície com a cola que posteriormente foi submetida novamente à ação da lixa; colocação final do extensómetro.

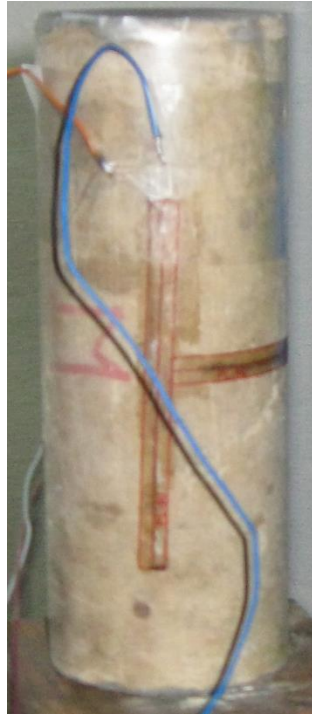


Figura 5.7 – Provete instrumentado

5.1.7.2.1. Procedimento dos ensaios

Com o objetivo de determinar o módulo de deformabilidade, foram realizados ensaios para os três graus de alteração, num ensaio com um ciclo de carga-descarga, com três fases:

1ª e 3ª fase - Carga até 1/3 da resistência a compressão uniaxial média obtida no Capítulo 5.1.6;

2ª fase - Descarga até aos 5 kN

Assim foi possível analisar o comportamento das deformações, quer axiais, quer laterais de todos os provetes.

Os ensaios foram realizados com o controlo da deformação através da taxa de carregamento constante. Todos os ensaios foram realizados sem pré-carga dos provetes e tendo estes um teor de água resultante da secagem à temperatura ambiente.

Na Tabela 5.7 apresentam-se os resultados obtidos da medição das deformações axiais e laterais e do coeficiente de *Poisson* em função do grau de alteração.

Tabela 5.7 – Resultados dos módulos de elasticidade e coeficiente de *Poisson* para os três graus de alteração.

	Descrição do provete	E_a (GPa)	E_l (GPa)	ν
W1	T16A	27,89	175,21	0,16
	T18A	22,69	185,00	0,12
W2	T58	20,14	98,26	0,21
	T39B	13,60	101,03	0,14
W3	T88	9,23	44,95	0,21
	T87B	17,72	21,11	0,24

E_a – Módulo de elasticidade axial estático

E_l – Módulo de elasticidade lateral estático

ν – Coeficiente de *Poisson* estático

Relativamente à resistência verifica-se na Tabela 5.5 que o calcário dolomítico mais são (W1) apresenta uma resistência à compressão uniaxial mais elevada de 67 MPa, e por sua vez também possui os módulos de elasticidade mais elevados, como se verifica nas Tabelas 5.6 e 5.7. Para os calcários dolomíticos W1, W2 e W3 verifica-se uma relação direta, entre a resistência a compressão uniaxial e os módulos de deformabilidade, ou seja, quando a resistência à compressão uniaxial diminui os módulos de elasticidade também decrescem. Em relação ao aumento do grau de alteração verifica-se uma relação inversa com os valores de resistência a compressão uniaxial e dos módulos de deformabilidade, quando o grau de alteração aumenta, os valores da resistência à compressão uniaxial e dos módulos de deformabilidade diminuem.

A Figura 5.8 mostra gráficos das curvas de tensão-deformação dos calcários em função do grau de alteração. Nas amostras de grau de alteração W1 e W2 foi possível identificar as diferentes fases da curva tensão. Para as amostras com grau de alteração W3, não se observa a fase I correspondente ao fecho das microfissuras da rocha.

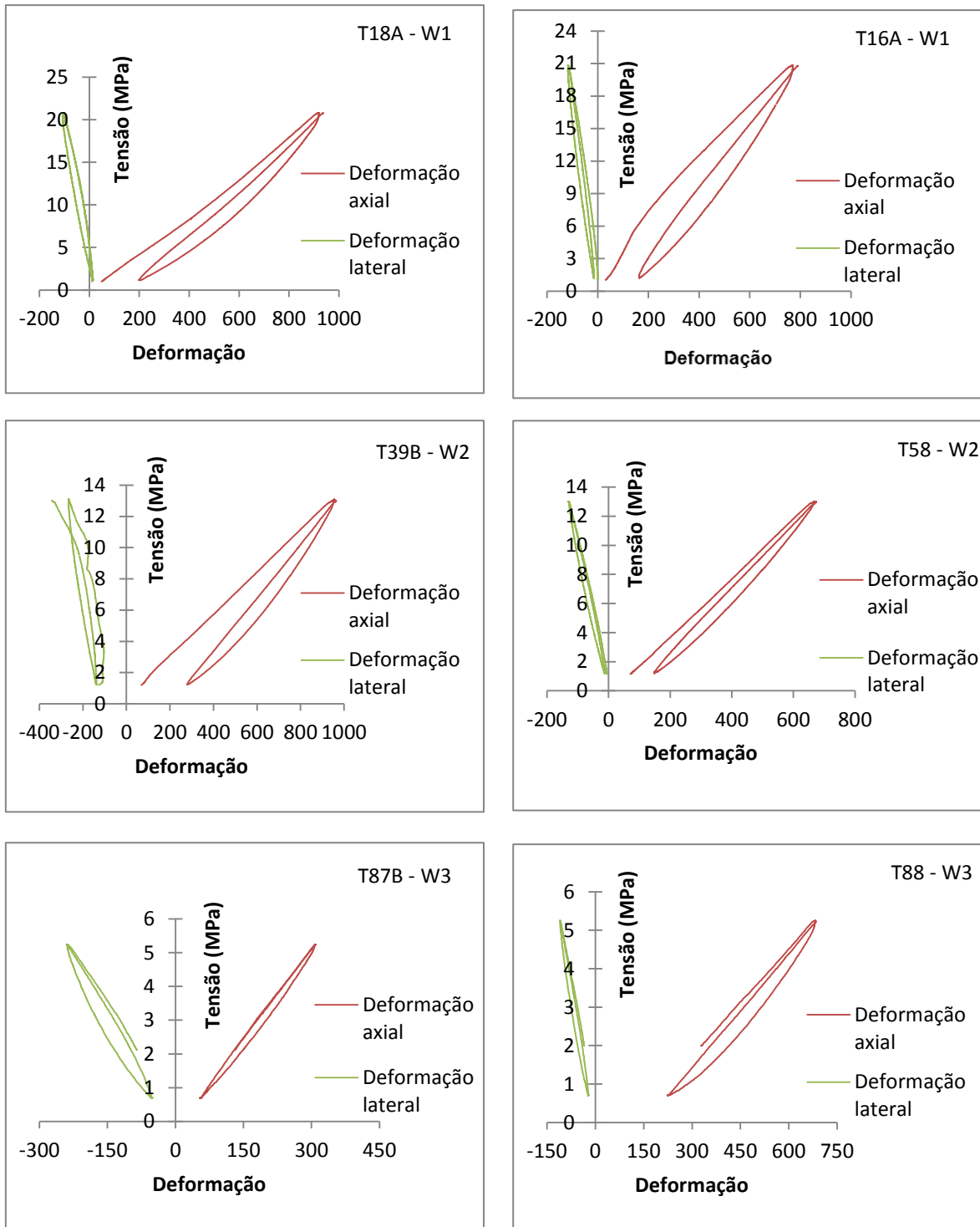


Figura 5.8 - Comportamento tensão - deformação dos seis provetes de calcário estudados para os três graus de alteração (W1, W2 e W3).

5.2. Classificação RMR de Bieniawski

No conjunto de sondagens disponíveis, foram estudadas 4, sendo elas: sondagem 3 no Laboratório *Chimico*, sondagem 4 da Faculdade de Farmácia, sondagem 1 e 2 do Colégio da Trindade.

Para um estudo mais detalhado, as sondagens foram previamente divididas em várias secções, esta divisão foi efetuada de acordo com o grau de alteração e de fracturação.

Com base na observação dos tarolos recolhidos das sondagens procedeu-se à classificação dos vários parâmetros descritos na Tabela 4.1 do Capítulo 4, posteriormente foram atribuídos pesos a esses mesmos parâmetros e apresentados nos ANEXOS III, IV, V e VI. Na Tabela 5.8 está representada uma síntese do valor de RMR para as várias sondagens.

Tabela 5.8 - Resultado da classificação RMR para as 4 sondagens estudadas.

Profundidade (m)	Laboratório <i>Chimico</i>	RMR	Classificação do maciço
De 1,4 a 2,8	1ª Secção	52,5	Maciço regular
De 2,8 a 3,50	2ª Secção	66	Maciço bom
De 3,7 a 6,6	3ª Secção	75,5	Maciço bom
De 6,6 a 7,70	4ª Secção	60,5	Maciço bom
	Média	63,63	Maciço bom
Faculdade de Farmácia			
De 1,55 a 2,60	1ª Secção	63	Maciço bom
De 2,60 a 6,00	2ª Secção	74	Maciço bom
De 6,00 a 8,05	3ª Secção	71	Maciço bom
	Média	65,25	Maciço bom
Colégio da Trindade - S1*			
De 0,60 a 2,20	1ª Secção	65	Maciço bom
De 2,20 a 3,95	2ª Secção	74	Maciço bom
	Média	69,50	Maciço bom
Colégio da Trindade - S2*			
De 4,50 a 5,60	1ª Secção	70	Maciço bom
De 5,60 a 6,50	2ª Secção	62	Maciço bom
De 6,50 a 7,50	3ª Secção	76	Maciço bom
	Média	69,33	

*S - Sondagem

Para todas as sondagens, o valor médio de RMR obtido segundo a Tabela 4.3 no Capítulo 4 insere-se no intervalo entre 61 e 80 (classe II), pelo que o maciço rochoso pode ser classificado como bom.

É de notar que na sondagem do laboratório Chimico a secção que se encontra mais à superfície representa um maciço de qualidade regular, com um valor de RMR inferior ao das restantes secções, o que se deve a uma maior grau de alteração do maciço. A quarta secção também apresenta uma ligeira diminuição do RMR, devido à diminuição da resistência a compressão uniaxial e a uma maior alteração das fraturas.

Na sondagem 1 do Colégio da Trindade, a secção que se encontra mais à superfície apresenta um RMR menor do que na segunda devido ao aumento do grau de fracturação e a consequente diminuição do RQD.

Na sondagem 2 do Colégio da Trindade, o RMR da secção intermédia diminui um pouco, devido ao aumento significativo do grau de fracturação.

A sondagem da Faculdade de Farmácia apresenta a 1ª secção com um RMR menor que nas outras duas secções, devido a um grau de fracturação maior, um RQD menor e as descontinuidades estarem mais alteradas.

6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo foram analisados os resultados obtidos no Capítulo 5. Na análise dos resultados foram realizados gráficos e tabelas de relação e/ou comparação entre os vários ensaios.

Foram analisadas as propriedades físicas e mecânicas dos materiais e procurou-se verificar a existência de alguma relação entre eles, que permitisse estabelecer a partir dos valores de um dado parâmetro os valores de outro parâmetro.

Na Tabela 6.1 é apresentada uma tabela síntese com os resultados médios determinados nos ensaios laboratoriais ao longo deste trabalho. Observa-se que os valores das velocidades, da massa volúmica aparente, resistência de Schmidt, resistência à compressão uniaxial, resistência a carga pontual, módulos de elasticidade e índice de durabilidade diminuem com o aumento do grau de alteração, sendo que com a porosidade acontece o inverso.

Tabela 6.1 – Médias dos dez parâmetros físicos e mecânicos determinados nos ensaios laboratoriais realizados no presente trabalho.

	Médias determinadas									
	V_p (m.s ⁻¹)	V_s (m.s ⁻¹)	MVA (kg.m ⁻³)	P (%)	R	$I_{S(50)}$	RCU (MPa)	E_d (GPa)	E_e (GPa)	Id2 (%)
W1	3661	2213	2465	13,6	36,7	3,50	67,0	19,740	25,29	99,2
W2	3551	2004	2310	19,0	32,9	1,79	34,6	13,300	16,87	99,3
W3	3214	1657	1954	30,7	25,9	0,96	18,9	8,830	13,48	80,1

Onde: V_p é a velocidade de propagação das ondas longitudinais; V_s é a velocidade de propagação das ondas transversais; MVA é a massa volúmica aparente; P é a porosidade; R é a resistência de Schmidt; RCU é a resistência a compressão uniaxial; E_d é o módulo de elasticidade dinâmico; E_e é o módulo de elasticidade estático; Id2 é o índice de durabilidade para o 2º ciclo.

Na Figura 6.1 apresenta-se a relação das V_p com as V_s para todos os provetes ensaiados neste trabalho. Observa-se uma correlação positiva entre as duas velocidades, com o aumento das velocidades de propagação das ondas longitudinais há um sucessivo aumento das velocidades de propagação das ondas transversais. Também se verifica que com a diminuição do estado de alteração há um aumento das velocidades. Existem alguns pontos dispersos, nomeadamente para os provetes de grau de alteração W3, esta dispersão pode ser justificada pelo elevado grau de alteração que os provetes apresentavam, estes tinham muitas fissuras que geravam uma diminuição acentuada das velocidades e alguns provetes apresentavam veios de calcite que provocariam um progressivo aumento das velocidades. Verifica-se um coeficiente de correlação, $R = 0,75$, sendo classificada de elevado.

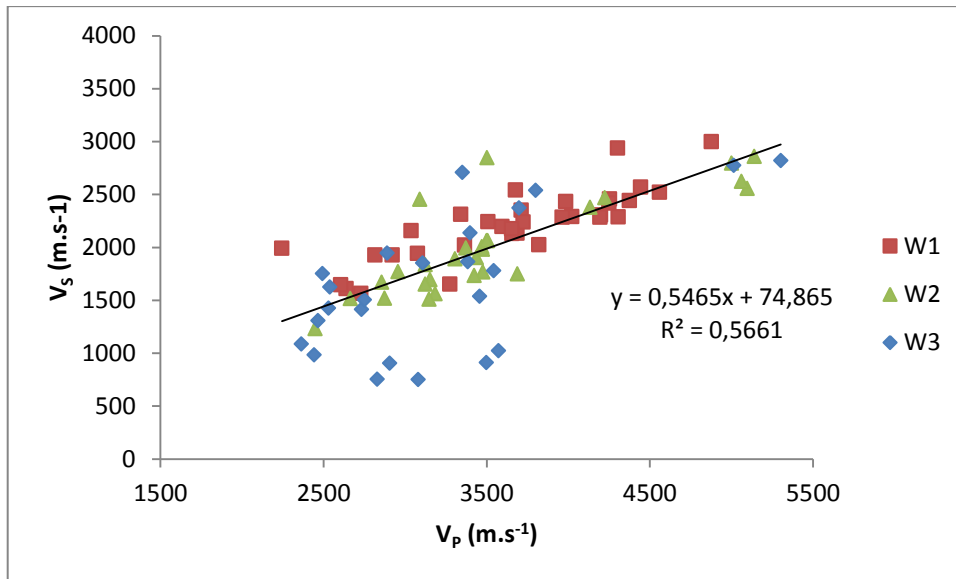


Figura 6.1 – Relação entre as V_p e V_s para todos os provetes ensaiados em função do grau de alteração.

Na Figura 6.2 apresenta-se de forma gráfica as diferentes velocidades de propagação das ondas longitudinais para os vários estados de alteração dos calcários dolomíticos. Observa-se com a diminuição do grau de alteração há um aumento médio das velocidades. Com aumento da alteração há uma maior variação entre os valores máximos e mínimos.

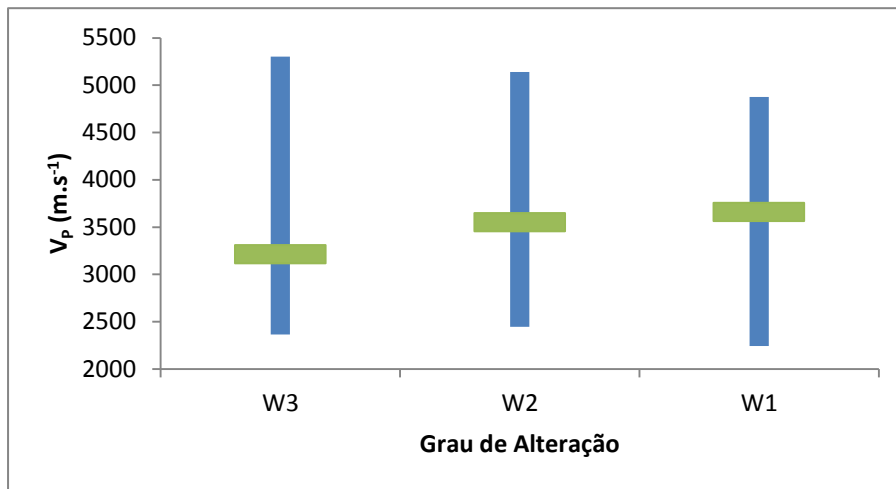


Figura 6.2 – Resumo do ensaio da velocidade de propagação das ondas longitudinais com os valores médio, mínimo e máximo para os três graus de alteração.

Na Figura 6.3 apresenta-se a relação da propagação das velocidades das ondas longitudinais com a dureza de Schmidt (R) para todos os provetes ensaiados. Observa-se uma correlação positiva, mas dispersa, entre as velocidades com a dureza de Schmidt. Com o aumento das velocidades há um sucessivo aumento da dureza de Schmidt. Verifica-se que com a diminuição do estado de alteração há um aumento das velocidades e da dureza de

Schmidt. O coeficiente de correlação apresenta um valor de $R = 0,55$, sendo classificado de moderado.

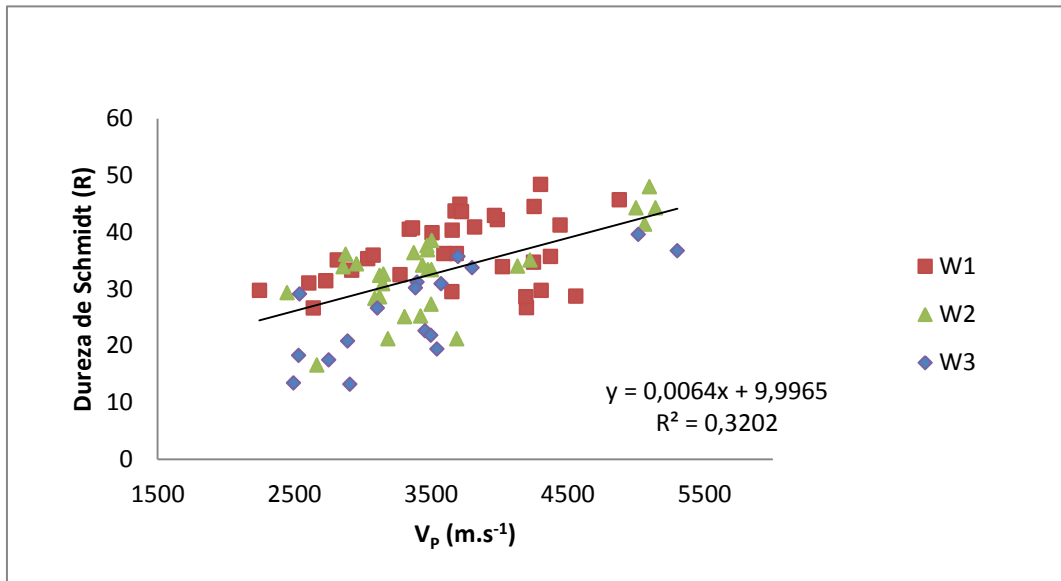


Figura 6.3 - Relação entre as V_p e a dureza de Schmidt para todos os provetes ensaiados.

Na Figura 6.4 apresenta-se a possível relação entre as velocidades das ondas P e o $Is_{(50)}$.

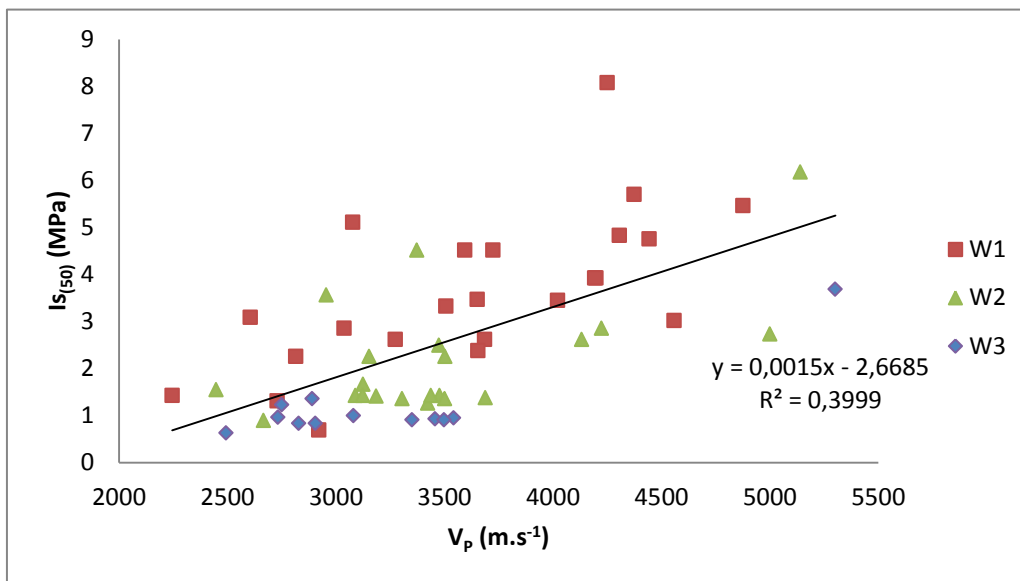


Figura 6.4 - Relação entre a V_p com $Is_{(50)}$ em função do grau de alteração.

Observa-se na Figura 6.4 uma correlação positiva entre as velocidades e o $Is_{(50)}$, com o aumento das velocidades há um sucessivo aumento da $Is_{(50)}$. Na Figura 6.4 é evidente a presença de três grupos com comportamentos diferentes, os quais são distinguidos pelos três graus de alteração, com diminuição do grau de alteração há um aumento gradual da

resistência à carga pontual. O coeficiente de correlação é $R = 0,63$, sendo classificada de moderado.

Na Figura 6.5 apresenta-se a relação da velocidade de propagação das ondas longitudinais com a resistência a compressão uniaxial.

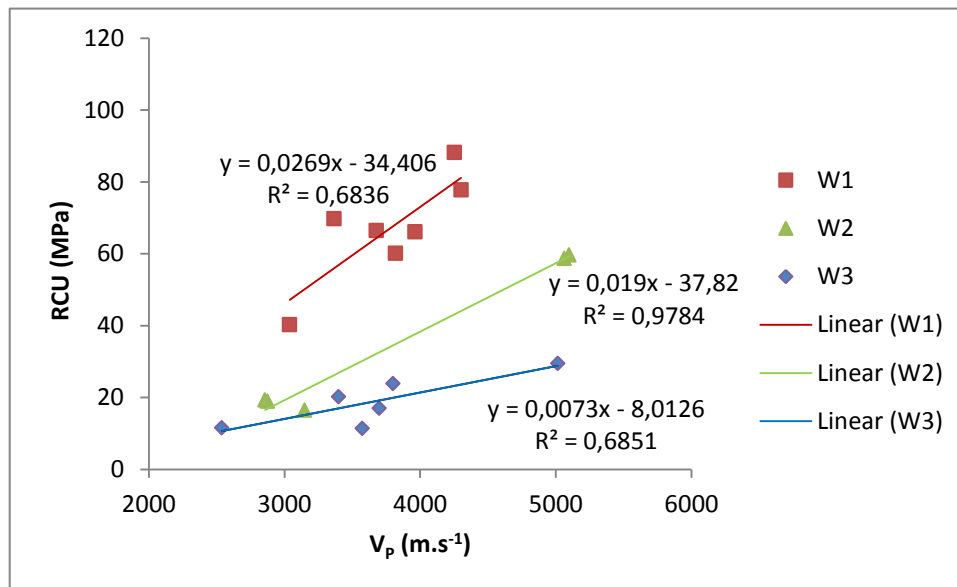


Figura 6.5 - Relação entre a V_p e a RCU para os três graus de alteração.

Na Figura 6.5 observa-se uma relação positiva entre a velocidade e a RCU, com o aumento da velocidade há um sucessivo aumento da RCU. Observam-se duas zonas de comportamentos diferentes, onde os valores da RCU para o grupo de grau de alteração W1 é mais elevado para os grupos W2 e W3. Nos grupos W1 e W3 a correlação apresenta um coeficiente de $R = 0,83$, sendo classificada de elevada. Para o grupo W2 a correlação é classificada de muito elevada por apresentar um coeficiente de correlação $R = 0,99$.

Na Figura 6.6 observa-se uma relação negativa entre a porosidade média e a velocidade de propagação das ondas longitudinais médias para os três grupos de alteração estudados. Com aumento da porosidade há uma diminuição da velocidade. Este gráfico apresenta uma distribuição com apenas três pontos de valores, por isso optou-se por não representar a possível reta de correlação do comportamento das velocidades das com a porosidade.

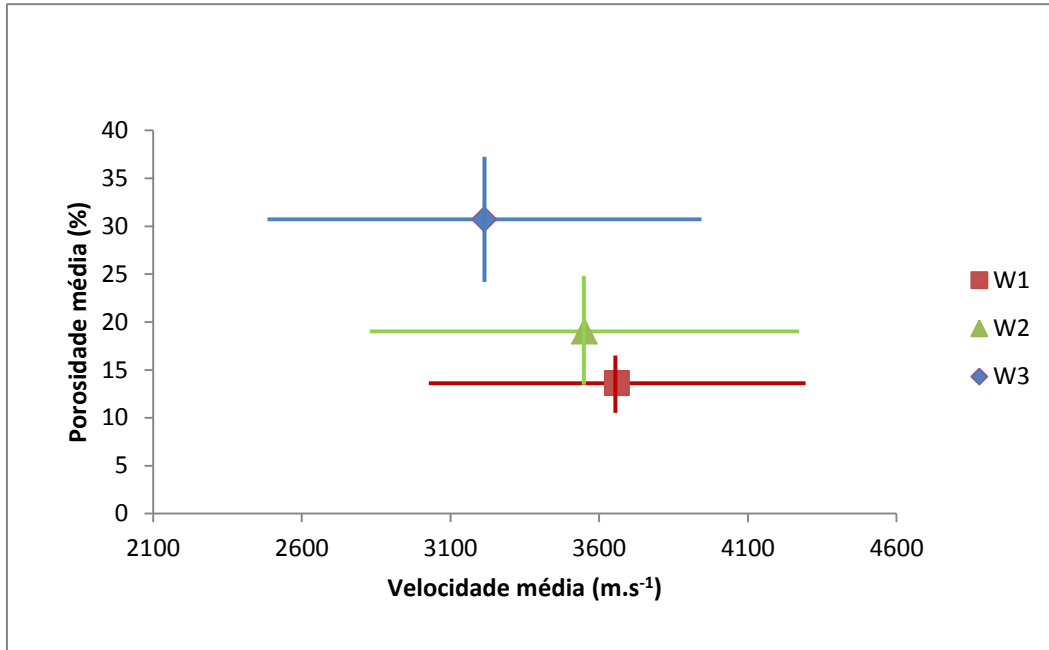


Figura 6.6 - Relação entre a V_p média e a porosidade média em função do grau de alteração.

Na Figura 6.7 apresenta-se a relação da dureza de Schmidt com a resistência a compressão uniaxial. Observa-se uma correlação positiva entre a dureza de Schmidt e a RCU, com o aumento do R há um sucessivo aumento da RCU. Com a diminuição do grau de alteração verifica-se um aumento da dureza de Schmidt e da RCU. O coeficiente de correlação é igual a $R = 0,85$, sendo classificado de elevado.

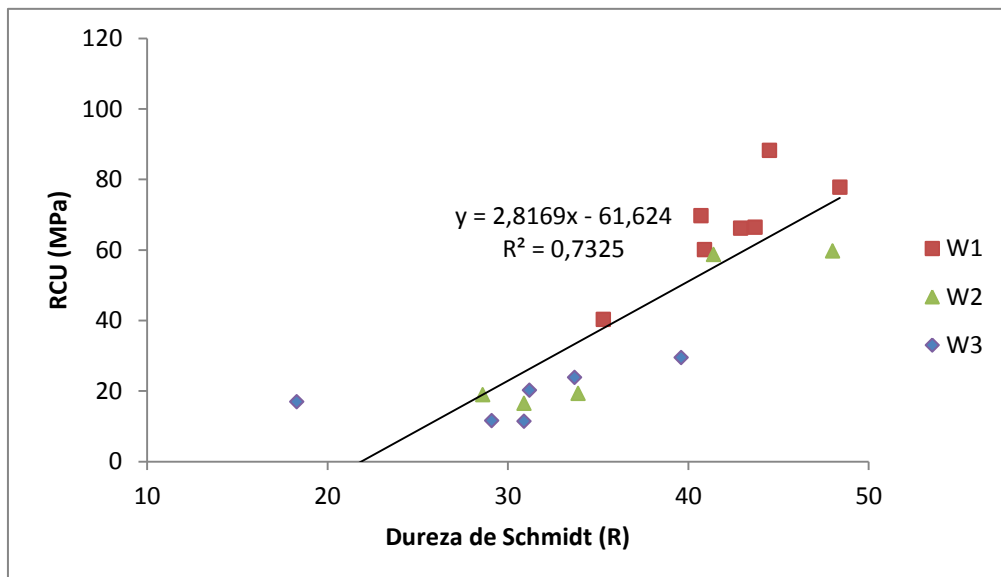


Figura 6.7 – Relação entre a dureza de Schmidt com a RCU.

Na Figura 6.8 apresenta-se um gráfico idêntico ao da Figura 6.7, mas neste gráfico os valores de RCU apresentados no eixo horizontal foram obtidos através da dureza de Schmidt e pelo ábaco da Figura 3.5 do Capítulo 3.3.

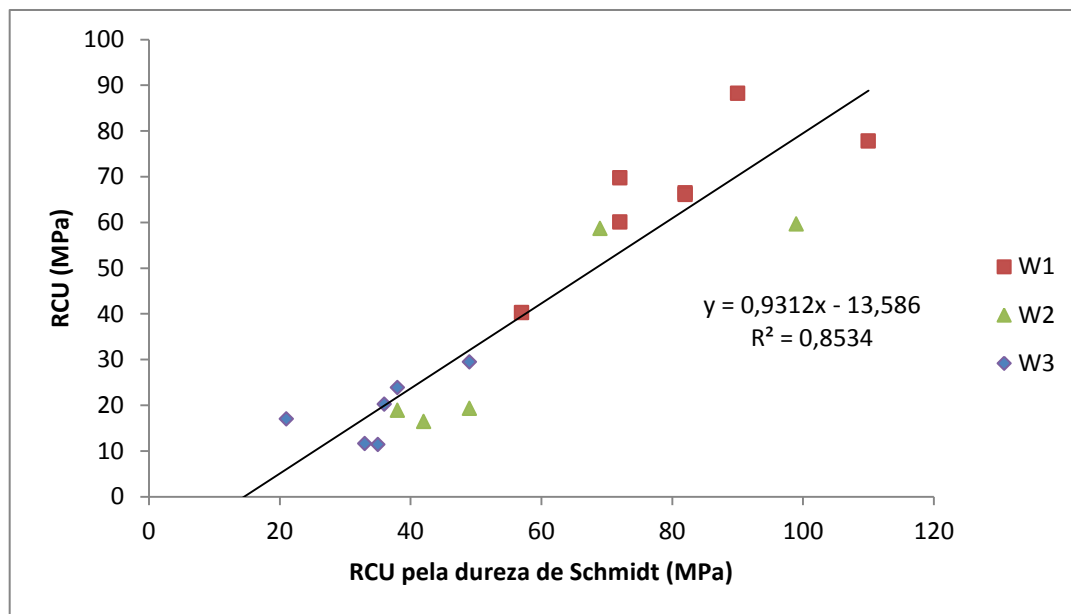


Figura 6.8 - Relação entre a RCU e a RCU obtida a partir da dureza de Schmidt e massa volúmica no ábaco de correlação.

Observa-se na Figura 6.8 que existe uma correlação positiva e mais elevada que a correlação da Figura 6.7, apresentando um coeficiente de correlação maior e de $R = 0,92$, sendo classificado como muito elevado.

Na Figura 6.9 apresenta-se a relação da dureza de Schmidt com o $Is_{(50)}$. Observa-se uma correlação positiva entre a dureza de Schmidt e $Is_{(50)}$, com o aumento da primeira há um sucessivo aumento da RCU. Existem alguns pontos dispersos, nomeadamente para os provetes de grau de alteração W1, onde há um aumento significativo do $Is_{(50)}$ sem ser correspondido pela dureza de Schmidt. Regista-se um coeficiente de correlação de $R = 0,64$, sendo classificado do moderado.

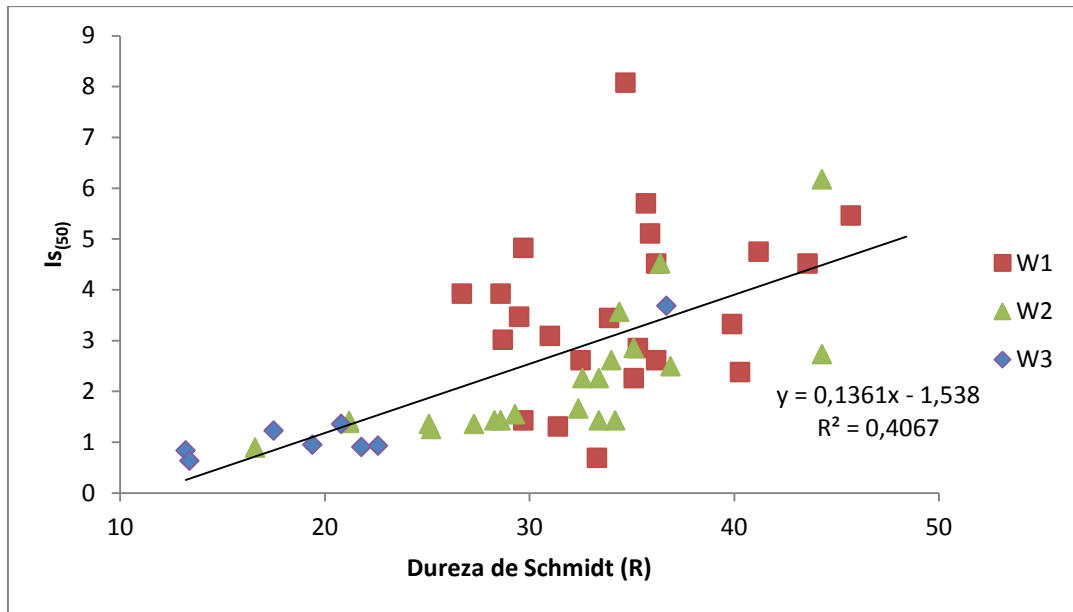


Figura 6.9 - Relação entre a dureza de Schmidt e o $Is_{(50)}$.

Na Figura 6.10 apresenta-se a relação do $Is_{(50)}$ médio com a RCU média em função do grau de alteração.

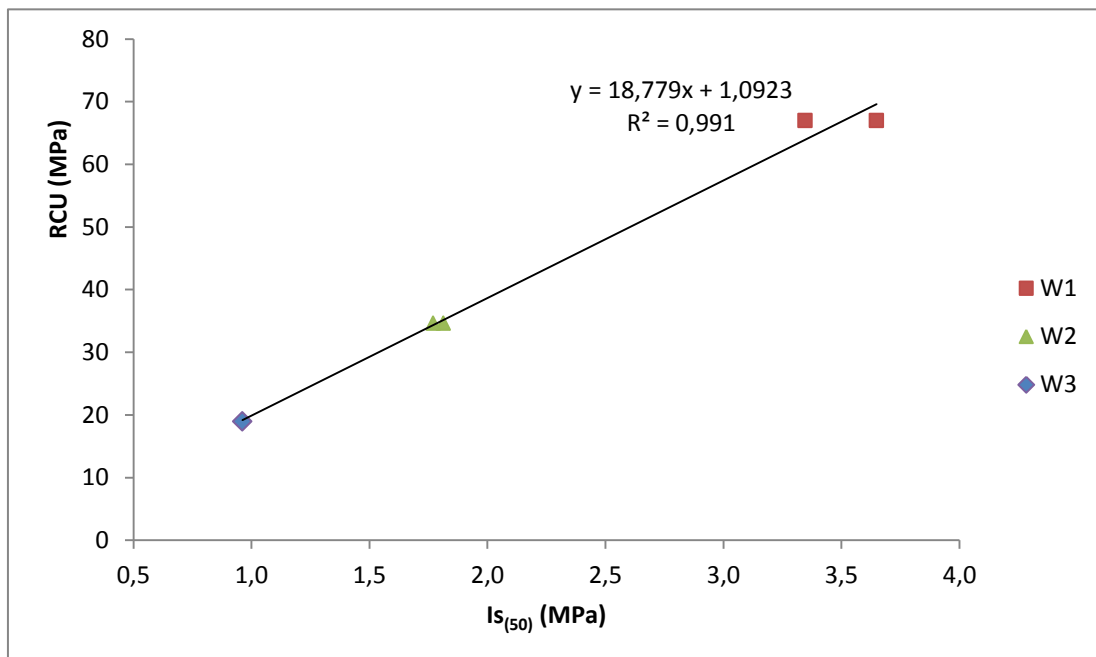


Figura 6.10 - Relação entre a RCU e o $Is_{(50)}$.

Verifica-se na Figura 6.10 que existe uma correlação positiva quase perfeita. Com o aumento do $Is_{(50)}$ há um sucessivo aumento da RCU. O coeficiente de correlação apresenta um valor de $R = 0,99$, sendo classificado como muito elevado.

No Capítulo 3.4 foi referido que Bieniawski obteve uma relação linear (expressão 8) que correlaciona o $Is_{(50)}$ com a resistência à compressão uniaxial. Andrade (2009) obteve duas relações (17 e 18) para os filádios, em que a direção da carga era perpendicular à xistosidade:

$$RCU = 32,07 \ln(Is_{(50)}) + 16,83 \quad (17)$$

$$RCU = 16,61 \times Is_{(50)} + 3,47 \quad (18)$$

No presente estudo obtemos a seguinte equação (expressão 18):

$$RCU = 18,779 \times Is_{(50)} + 1,0923 \quad (18)$$

Para a expressão 18 se consideramos o valor 1,0923 como desprezível, vamos obter uma relação igual à de Bieniawski, onde o fator de multiplicação do $Is_{(50)}$ para obter a RCU é igual de 19.

Na Figura 6.11 apresenta-se a relação entre a massa volúmica aparente e a porosidade em função do grau de alteração.

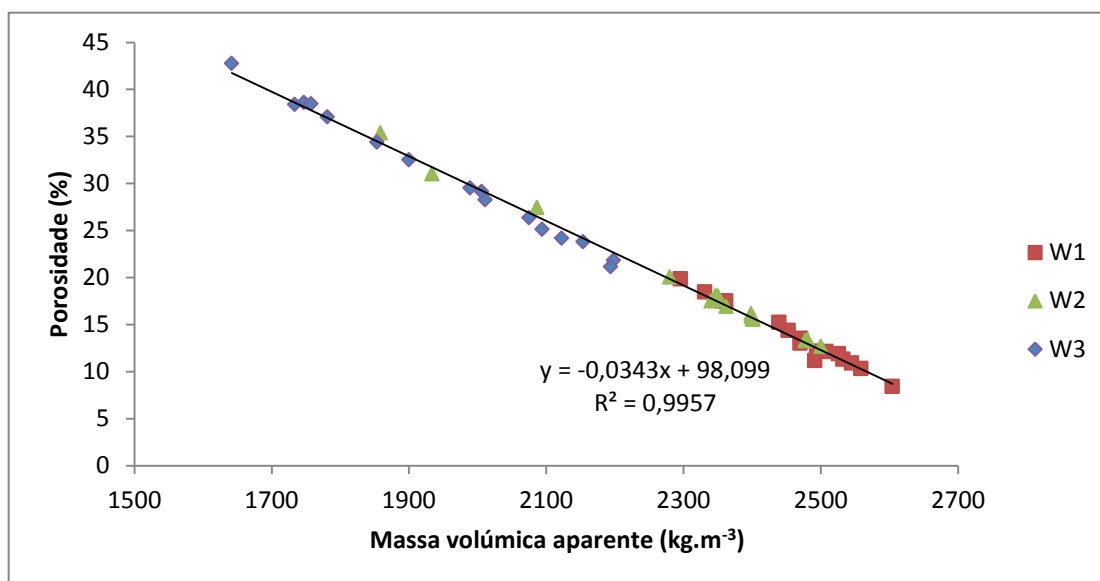


Figura 6.11 – Relação entre a massa volúmica aparente e a porosidade em função do grau de alteração.

Como se verifica na Figura 6.10 há uma relação inversa perfeita, com o aumento da porosidade há uma diminuição da massa volúmica aparente constante. Com a diminuição do grau de alteração, há um aumento da massa volúmica aparente. O coeficiente de correlação apresenta um valor de $R = 0,99$, sendo classificado como muito elevado.

Na Figura 6.12 apresenta-se a relação entre os módulos de elasticidade dinâmico (E_d) e estático (E_e) para os três graus de alteração. Verifica-se que existe uma relação positiva.

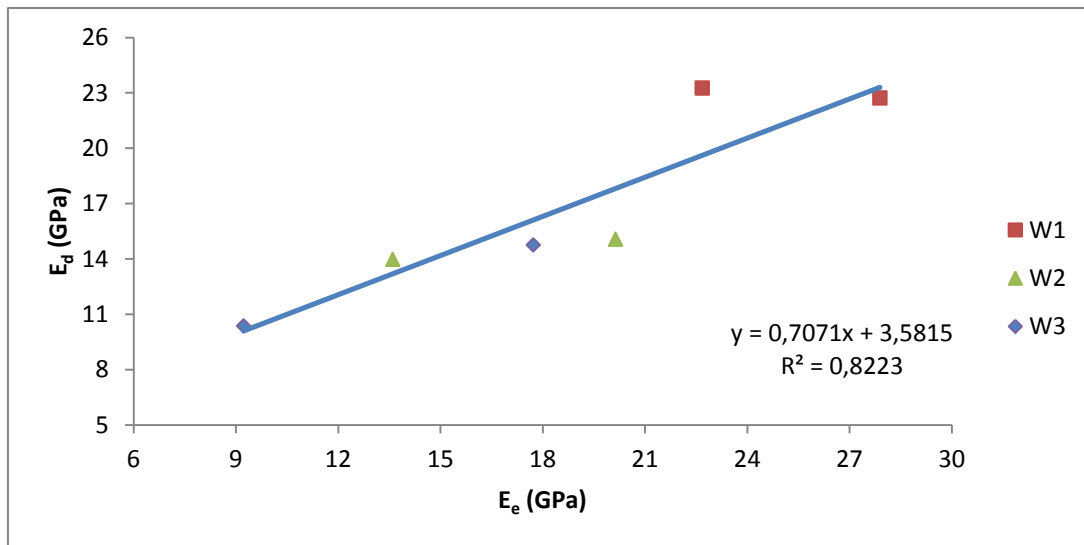


Figura 6.12 – Relação entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático.

O módulo de elasticidade dinâmico apresenta-se ligeiramente menor, como se verifica pela equação (expressão 19) obtida no gráfico:

$$E_d = 0,7071 \times E_{(e)} + 3,5815 \quad (19)$$

Na Tabela 6.2 são comparados os módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos para os calcários estudados. Verifica-se que há uma tendência dos valores de E_e serem superiores aos de E_d , há três calcários com o módulo de deformabilidade dinâmico mais alto e os restantes mais baixos. Pela razão média de E_d/E_e , há uma pequena superioridade do módulo de elasticidade estático, como já se tinha verificado na equação (expressão 19).

Tabela 6.2 – Comparação dos módulos de deformabilidade estáticos e dinâmicos para os calcários analisados.

Grado de Alteração	Designação do provete	E_e (GPa)	E_d (GPa)	E_d/E_e
W1	T16A	27,89	22,72	0,81
	T18A	22,69	23,26	1,03
W2	T58	20,14	15,07	0,75
	T39B	13,60	13,98	1,03
W3	T88	9,23	10,38	1,12
	T87B	17,72	14,76	0,83
			Média	0,93

Na Figura 6.13 apresenta-se a relação entre a RCU média e a porosidade média em função do grau de alteração. Verifica-se que existe uma relação negativa, com o aumento da porosidade há uma diminuição da resistência a compressão uniaxial. Este gráfico apresenta uma distribuição com apenas três pontos de valores, por isso é apenas representativo e não tem um significado estatístico da variação do comportamento da RCU com a porosidade.

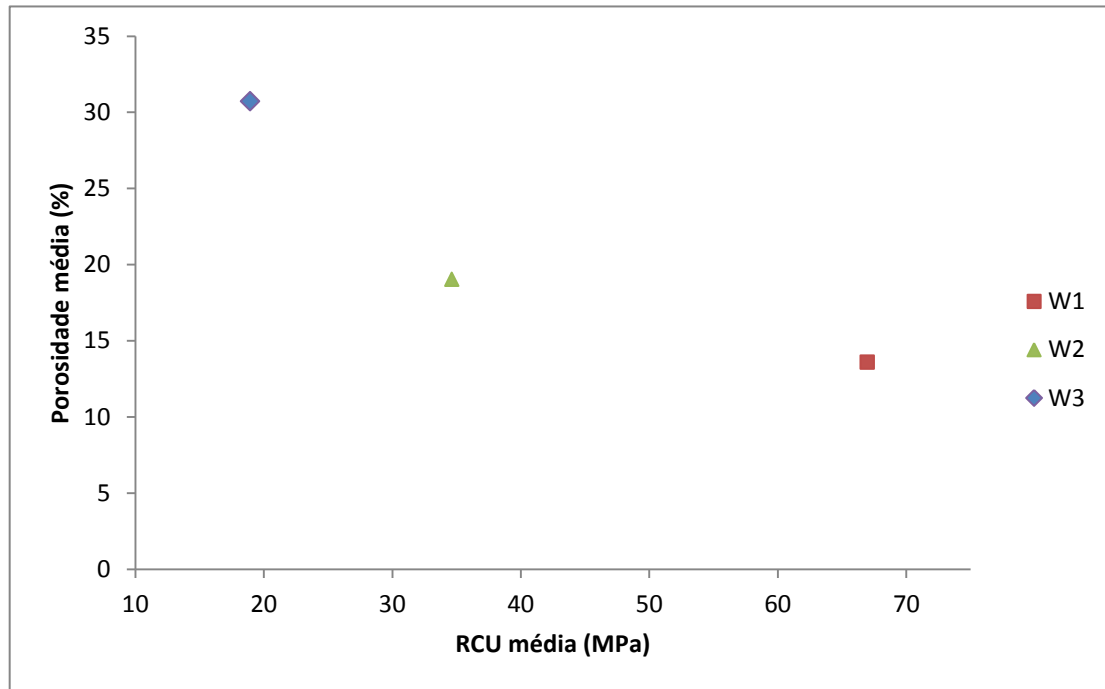


Figura 6.13 - Relação entre a RCU média e a porosidade média em função do grau de alteração.

Na Figura 6.14 apresenta-se a relação entre o valor médio do módulo de elasticidade dinâmico e a média da porosidade para os três graus de alteração. Foi escolhido E_d em vez do E_e , por ser o mais representativo, porque o E_d foi realizado para todos os provetes disponíveis.

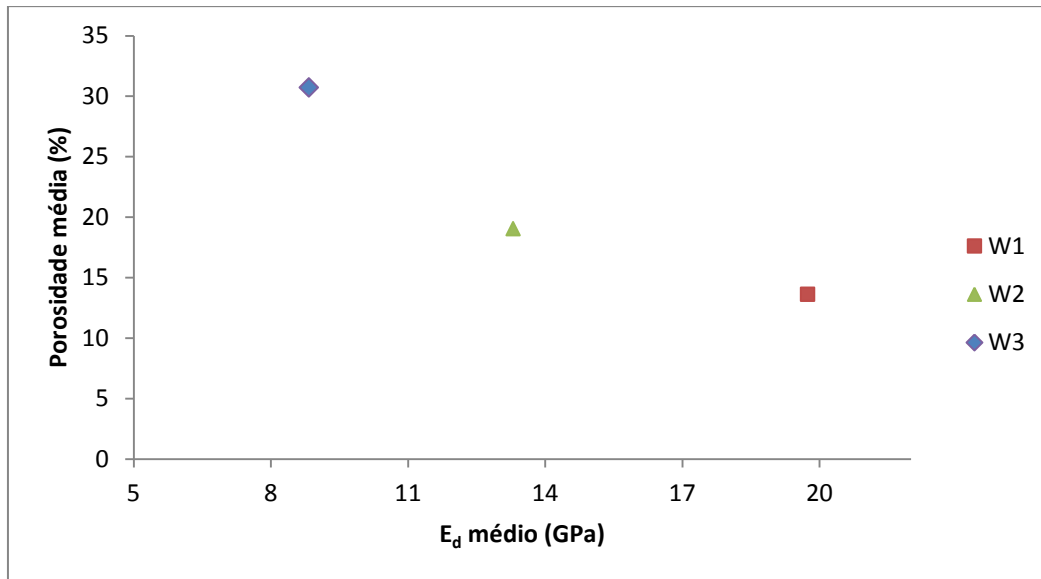


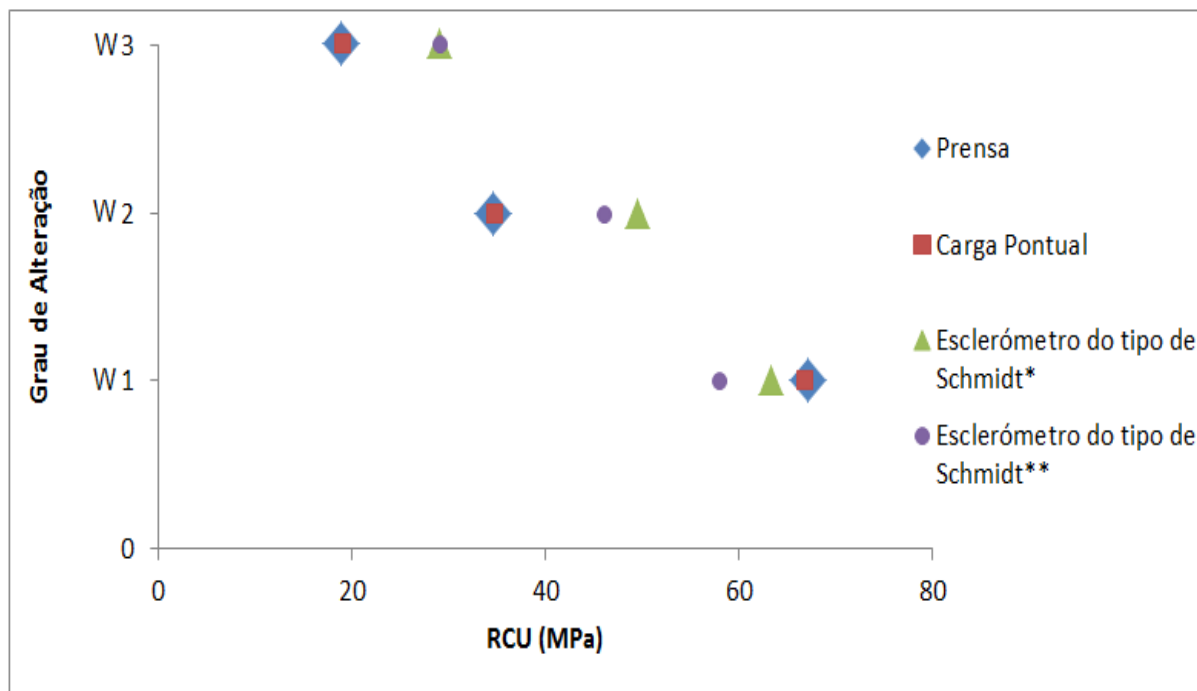
Figura 6.14 – Relação entre o E_d médio e a porosidade média para os três graus de alteração estudados.

Verifica-se na Figura 6.14 que existe uma relação negativa, com o aumento da porosidade há uma diminuição do módulo de deformabilidade. Quanto maior o grau de alteração, menor o módulo de deformabilidade. Este gráfico apresenta uma distribuição com apenas três valores, por isso é apenas representativo e não apresenta uma correlação fiável, em termos estatísticos da variação do comportamento do módulo de deformabilidade com a porosidade.

Por existir uma correlação negativa perfeita entre a massa volúmica aparente e a porosidade (Figura 6.11), não se apresenta o gráfico de relação entre a massa volúmica aparente e o módulo de deformabilidade, uma vez que este seria idêntico ao da porosidade, mas evidenciando uma correlação positiva.

O módulo de elasticidade está diretamente relacionado os valores da RCU, logo os gráficos das Figuras 6.13 e 6.14 são muito idênticos.

Na Figura 6.15 observa-se uma comparação média das três resistências à compressão uniaxial obtidas pelos três métodos diferentes realizados neste trabalho. Para a determinação RCU a partir do ensaio de carga pontual, foi usada a equação (expressão 18) obtida na Figura 6.9. Na determinação da RCU a partir do ensaio do martelo de Schmidt foi obtida a partir da correlação do ábaco (Figura 3.2 no Capítulo 3.3) com massa volúmica aparente, a posição do martelo e o R.



*Média da RCU a partir de cada provete individualmente.

**RCU a partir do R médio para o conjunto de provetes (Tabela 5.2).

Figura 6.15 – Comparação da RCU obtida pela prensa, carga pontual e esclerómetro do tipo de Schmidt em função do grau de alteração.

No Figura 6.15 pode verificar-se que há uma relação negativa para a média dos três ensaios, com a diminuição do grau de alteração há um aumento da RCU. Comparando o ensaio realizado na prensa com o ensaio de carga pontual, verifica-se que existe uma correlação muito fiável, visto que os pontos se encontram sobrepostos. Em comparação com o martelo de Schmidt, verifica-se que há um pequeno desfasamento. Para os provetes W1 e W2 há um aumento significativo da RCU, e para o W3 há uma pequena diminuição. Observa-se duas resistências a compressão uniaxial diferentes a partir do ensaio do esclerómetro do tipo de Schmidt, porque o ábaco tem uma escala exponencial, logo o erro é maior.

Na Figura 6.16 apresenta-se a relação entre a RCU e o índice de durabilidade no fim do segundo ciclo, que foi obtido no ensaio de desgaste em meio húmido.

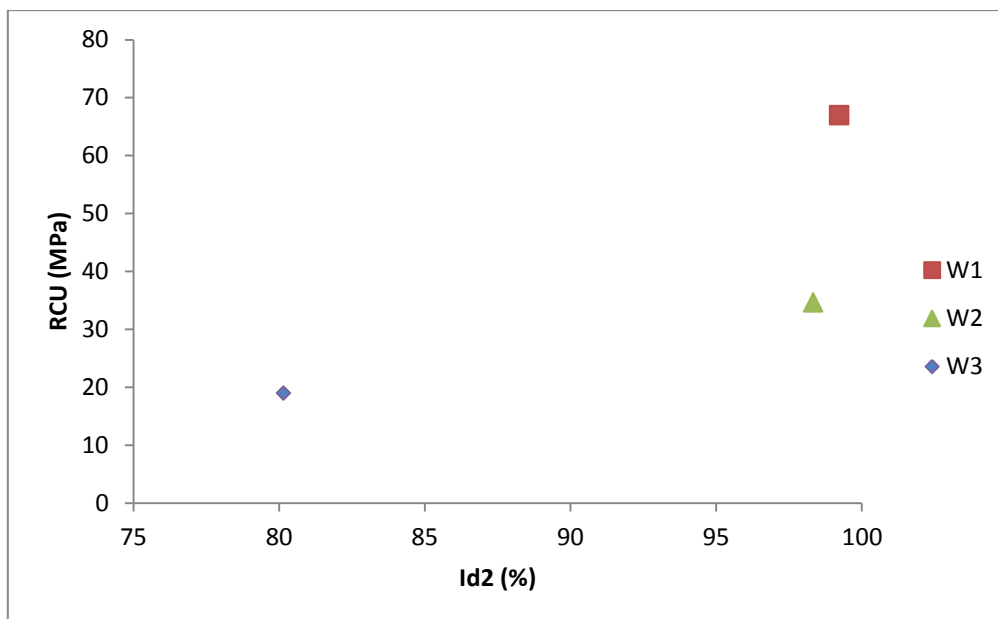


Figura 6.16 - Relação entre as RCU e o índice de durabilidade no fim do segundo ciclo.

Na Figura 6.16 observa-se uma relação positiva, com o aumento da RCU há um aumento da durabilidade. De destacar que o grupo de alteração W3 apresenta um grande desgaste, porque o material apresenta-se mais alterado e argiloso. O grupo de alteração W2 apresenta uma durabilidade muito próxima de W1. A maior alteração no material estudado aparece junto das discontinuidades nos topos dos provetes, pelo que estas extremidades ao serem cortadas para a obtenção de provetes para a realização dos ensaios, levaram à eliminação de grande parte da alteração existente no provete, o que provocou uma aproximação das características dos provetes entre o grupo de alteração W2 e W1.

Não foram apresentados mais gráficos com a relação do índice de durabilidade, sendo que se verifica uma diminuição do grau de alteração com o aumento dos valores dos seguintes parâmetros: V_P , $Is_{(50)}$, massa volúmica e dureza de Schmidt. Para a porosidade verifica-se uma relação positiva entre os seus valores e o incremento do grau de alteração.

7. CONCLUSÕES

7.1. Considerações finais

Neste trabalho procura-se mostrar a importância do estudo das propriedades físicas e mecânicas dos calcários dolomíticos para a compreensão do seu comportamento geotécnico. Os materiais estudados compreendem os graus de alteração de W1 a W3 segundo a classificação da ISRM (1981).

Os valores determinados para a velocidade de propagação das ondas longitudinais, varia entre 2245 m.s^{-1} e 5302 m.s^{-1} e para as ondas transversais de 750 m.s^{-1} e 3000 m.s^{-1} . Pela classificação da IAEG (1979) classificou-se a V_p para os calcários dolomíticos de grau de alteração W1 e W2 como média (3661 m.s^{-1} ; 3551 m.s^{-1}) e de baixa para W3 (3214 m.s^{-1}).

O valor de RMR calculado tendo em conta todos os parâmetros da classificação de Bieniawski (1989), variou entre 64 e 70 para as quatro sondagens estudadas, que classifica o maciço de boa qualidade.

A massa volúmica aparente nos calcários estudados segundo a IAEG (1979), é classificada de média para os grupos de alteração W1 e W2 e de baixa para o W3.

A porosidade aberta para o grupo de alteração W1 é classificada como média, para o W2 de elevada e para o W3 de muito elevada. Dos resultados obtidos, como se pode observar na Figura 6.11, constata-se um aumento geral dos valores do peso volúmico aparente com a diminuição da porosidade.

Pela classificação de Bieniawski (1979) pode classificar-se a resistência do maciço rochoso, obtida pelos ensaios de resistência a compressão uniaxial e carga pontual, de elevada para os calcários de grau de alteração W1, moderada para W2 e branda para o W3. O valor médio para da RCU para o grupo W1 é de 67 MPa, 35 MPa para o W2 e 19 MPa para o W3.

No ensaio de desgaste em meio húmido, segundo a classificação de Gamble (1971), para o 2º ciclo classifica-se a durabilidade muito alta para os grupos W1 e W2 (99 %; 98 %) média para o grupo W3 (80 %).

A caracterização efetuada nestes calcários permitiu evidenciar algumas características que ajudaram a compreender a variação das suas propriedades ao longo da evolução da sua alteração. Verificou-se que a porosidade tende a crescer com o incremento de alteração do material rochoso, a este aumento corresponde uma diminuição da

velocidade de propagação dos ultra-sons e também uma diminuição da densidade da rocha. Estas propriedades conjugadas com a observação macroscópica permitem identificar e confirmar os vários graus de alteração apresentados pelas rochas carbonatadas.

Verificou-se a existência de correlações moderadas entre as velocidade de propagação das ondas longitudinais com a dureza de Schmidt ($R = 0,56$), entre o $Is_{(50)}$ ($R = 0,62$) e a resistência à compressão uniaxial (RCU) ($R = 0,52$), apresentado todas elas relações positivas. Para cada grupo de calcários dolomíticos, e com o mesmo estado de alteração, verifica-se que existe um aumento do valor do coeficiente de correlação entre os valores da RCU e as velocidades das ondas P, sendo a ser elevada para o grupo W1 e W3 ($R = 0,83$), e muito elevada para o grupo W2 ($R = 0,99$). Entre a velocidade de propagação das ondas longitudinais e as transversais definiu-se uma correlação elevada ($R = 0,75$).

Os ensaios realizados para a determinação da resistência do maciço rochoso, tais como a resistência à compressão uniaxial, carga pontual e determinação da dureza de Schmidt, efetuados nos provetes confirmam a existência de quatro correlações positivas entre si. Entre a RCU e a dureza de Schmidt há um coeficiente de correlação elevado ($R = 0,86$). Para a RCU e a resistência à compressão uniaxial obtida a partir da dureza de Schmidt definiu-se um coeficiente de correlação muito elevado ($R=0,92$). Entre o $Is_{(50)}$ e a dureza de Schmidt verificou-se a existência de um coeficiente de correlação moderado ($R = 0,64$). Por fim, entre a RCU e o $Is_{(50)}$ obteve-se um coeficiente de correlação muito elevado ($R = 0,99$).

Para as determinações da deformabilidade dos calcários dolomíticos encontrou-se um coeficiente de correlação muito elevado entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico ($R = 0,91$).

O estudo da caracterização mecânica dos calcários dolomíticos para os três graus de alteração estudados permitiu concluir que ao nível dos parâmetros de deformabilidade, físicos e mecânicos existem diferentes comportamentos para os vários graus de alteração. Para os resultados da resistência à compressão uniaxial, da velocidade de propagação das ondas, da massa volúmica aparente, do índice de durabilidade e do módulo de elasticidade, há uma relação inversa com o aumento do grau de alteração. Para a porosidade há uma relação positiva com o incremento do grau de alteração.

As correlações entre as diferentes propriedades que se obtiveram são meramente indicativas. Na Tabela 7.1 estão apresentadas as oito correlações mais relevantes obtidas neste trabalho, com coeficientes de correlação elevados ($R > 0,7$) e muito elevados ($R > 0,9$). Alguns dos ensaios efetuados necessitam de um maior número de testes, deve

igualmente recorrer-se a outros tipos ensaios de modo a que caracterização dos calcários dolomíticos seja mais completa.

Tabela 7.1 - Resumo dos coeficientes de correlação obtidos para os calcários dolomíticos das Camadas de Coimbra

Propriedades relacionadas	Relações empíricas	Coefficiente de correlação (R)	Nº de provetes de amostragem
V_s com as V_p	$V_s = 0,5465 V_p + 74,865$	0,75	85
$RCU_{(W1)}$ com as V_p	$RCU = 0,0269V_p - 34,406$	0,83	7
$RCU_{(W2)}$ com as V_p	$RCU = 0,019V_p - 37,82$	0,99	5
$RCU_{(W3)}$ com as V_p	$RCU = 0,0073V_p - 8,0126$	0,83	6
RCU com o R	$RCU = 2,8169R - 61,624$	0,86	18
RCU com o RCU pela dureza de Schmidt	$RCU = 0,9312RCU_{(R)} - 13,586$	0,92	18
RCU com o $Is_{(50)}$	$RCU = 18,779Is_{(50)} + 1,0923$	0,99	5 (18+47)*
E_d com o E_e	$E_d = 0,7071E_e + 3,5815$	0,91	6

*5 pontos de amostragem; 18 provetes utilizados para as médias da RCU; 47 provetes utilizados nas 5 séries do $Is_{(50)}$.

Método de Escavabilidade de Franklin

Se se pretender fazer uma escavação nos calcários dolomíticos da área estuda (realização de garagens ou parques de estacionamento subterrâneos), o método de Franklin (Franklin et al., 1971) permite a elaboração de uma classificação do maciço rochoso de acordo com a resistência da rocha ($Is_{(50)}$, a RCU e a Dureza de Schmidt) e também de pelo espaçamento médio entre fraturas e os valores do RQD.

O método de Franklin, conforme se pode observar na Figura 7.1, permite a definição quatro metodologias de desmonte do maciço rochoso: escavação mecânica, escarificação, uso de explosivos para desagregação, e desmonte com explosivo.

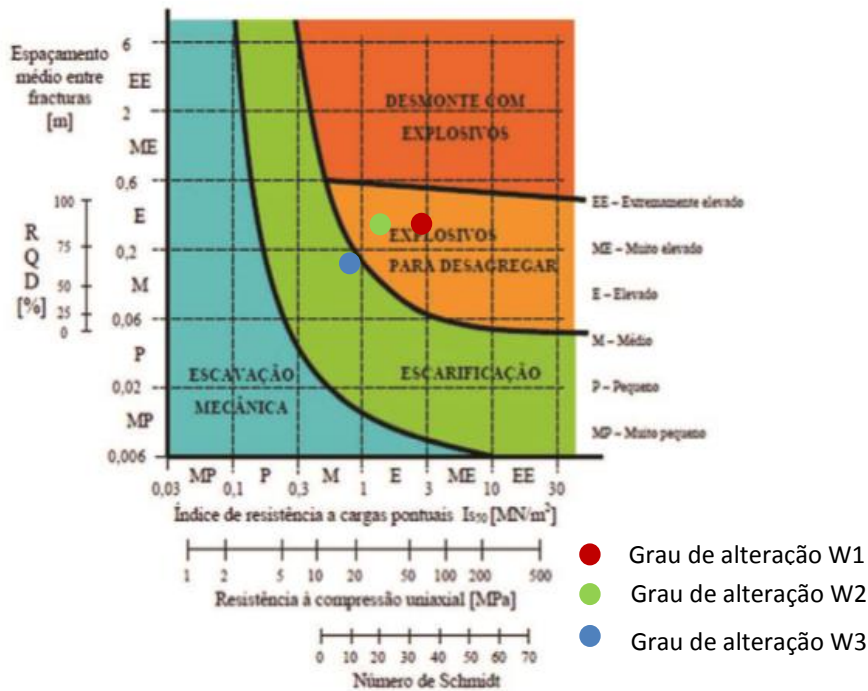


Figura 7.1 – Classificação da escavabilidade de maciços rochosos (adaptado de Franklin et al, 1971), com a projeção dos pontos para a escavabilidade dos calcários dolomíticos nos três estados de alteração.

Como se verifica nos pontos projetados na Figura 7.1 para os calcários dolomíticos de grau de alteração W1 e W2 o método de escavação a adotar seria o uso de explosivos para desagregar, sendo que para o W3 seria a escarificação (uso de ripper).

7.2. Possíveis trabalhos futuros

Para melhor conhecimento das características geotécnicas dos calcários dolomíticos é sugerido que para além classificação RMR, a utilização de outras classificações de caracterização do maciço rochoso como o *Basic Geotechnical Description (BGD)* e o *Geological Strength Index (GSI)*. Deverão realizar-se outros ensaios laboratoriais como: o ensaio de Los Angeles, o Micro-Deval, o ensaio de tração ou brasileiro, o ensaio de deslizamento em diáclases, a saturação em água e o ensaio de gelividade.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, A. C.; Soares, A. F.; Cunha, L.; Marques, J. F. (1989) – “Proémio ao estudo do Baixo Mondego”. Biblos – vol. LXXVI, Coimbra.
- American Society for Nondestructive Testing (ASNT) (1981) - Nondestructive Testing, ultrasonic. Classroom Training Handbook CT-6-4, second edition. General Dynamics, Convair Division, 277 páginas.
- Andrade, P. (2004) - "Caracterização Geomecânica e Análise da Estabilidade em Maciços Rochosos Anisotrópicos". Tese de Doutoramento, Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Andrade, P. S.; Saraiva, A. A. (2009) - “Physical and mechanical characterization of phyllites and metagreywackes in central Portugal” Bull Eng Geol Environ (2010) 69: pp. 207–214.
- Aufmuth, R.E. (1974) – Site engineering index of rock. ASTM Spec. Tech. Publ., 554, pp. 81-99
- Barbosa, B.; Soares, A. F.; Rocha, R.B.; Manuppella, G. (1988) – “Carta Geológica de Portugal, escala 1:50000. Notícia explicativa da folha nº19 A – Cantanhede”. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 46 p.
- 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. (1974) - “Estimating the strength of rock materials”. The Jour. Of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 74, N°8, pp. 312-320.
- Bieniawski, Z.T. (1975) - “The point-load test in geotechnical practice”. Engineering Geology, 9, pp. 1-11.
- Broch, E. (1974) - “The influence of water on some rock properties”. Proc. 3rd Int. Cong. Of the ISRM, Vol. 2, pp.33-38, Denver.
- Broch, E. e Franklin, J. A. (1972) - “The point-load strength test”. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 9, pp. 669-697.
- CEN prEN 1936 (1997) – “Methods of test for natural stone units – determination of real density and apparent density, and of total and open porosity”.
- Choffat, P. (1880) – “Étude stratigraphie et paléontologique ds terrains jurassiques du Portugal. 1ère livraison: Le Lias et le Dogger au Nord du Tage”. Mém. Sect.Trav. Géol. Portugal, 12, 72p., 6fig., Lisbonne.
- Cunha. P. (1999) – “Unidades litostratigráficas do Terciário na região de Miranda do Corvo-Viseu (Bacia do Mondego – Portugal)”. Com. Inst. Geol. e Mineiro, Lisboa, t. 86,pp.143-196.
- Douglas, P. M. e Voight, B. (1969) – Anisotropy of granites: a reflection of microscopic fabric”. Géotechnique, Vol.19, N°3, pp.376-398.
- Drury, J. C. (1992) - Ultrasonic Flaw Detection for Technicians. OIS Power & Nuclear Division, 201 páginas.
- El-Gohary, M. A. (2012, 21 Dezembro) - Evaluation of Treated and Un-treated Nubia Sandstone Using Ultrasonic as a Non Destructive Technique. Journal of Archaeological Science, Vol.40 (4) 2013, páginas 2190 a 2195.
- Ferrer, M. (1986) – “Reporto f na investigation of rock strength and failure using servo-controlled testing equipamento and specimens from Penarroya”. Eng. Geology Section, Imperial College of Science and Technonogy, London
- Figueiredo, F. P. (2012) – Apontamentos das aulas de obras subterrâneas lecionadas em 2012/13.
- Fooks, P.G., Gourley, G.S. e Ohikere, C. (1988) – “Rock Weathering in engineering time”. Quartely Journal of Engineering Geology, 21, pp.33-57.
- Franklin J. & Katsabanis T., (1971). Measurement of Blast Fragmentation. A. A. Balkema, Netherlands.

- 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.
- Hack, R. (1998) - "Slope Stability Probability Classification". International Institute for Aerospace and Earth Sciences, Delft, The Netherlands.
- Hoek, E. ; Bray, J. W. (1981) - *Rock Slope Engineering*. The Institution of Mining and Metallurgy. London.
- Hudson, J., e Harrison, J.P. (1997) –"Engineering rock mechanics - An introduction to the principles". Pergamon, Elsevier Science Ltd.
- Hudson, J.A.; Crouch, S.L. e Fairhurst, C. (1972) – Soft, stiff and servo-controlled testing machines: a review with reference to rock failure". *Eng. Geol.* 6, N°3, pp.155-189.
- IAEG (1979) – "Classification of rocks and soils for engineering geological mapping", Part 1 – rock and soils materials. *Bulletin of the International Association Engineering Geology*.
- ISRM (1978) – *Suggested Method For Determination Of The Schmidt Rebound Hardness*, *Internacional Journal of Rock Mecanics and Mining Sciences & Geomechanic*, Vol. 15, No 3, pp 89-97.
- ISRM (1981) - *Rock Characterization Testing & Monitoring. ISRM Suggested Methods*. Ed. E. T. Brown. Published for the Commision on Testing Methods. Pergamon Press, Oxford.
- ISRM (1985) - Suggested Method for Determining Point Load Strenght. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Science and Geomech*, 22 (2), pp. 51-60.
- ISRM (1999) – "Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.36, pp.279-289.
- Katz, O.; Reches, Z.; Roegiers, J-C. (2000) - Evaluation of Mechanical Rock Properties using a Schmidt Hammer. *Int. J. Rock Mechanics and Mining Science and Geomech*. Technical Note. 37, pp. 723-728.
- Leong, E., Yeo, S., Rahardjo, H. (2004). Measurement of Wave Velocities and Attenuation using an Ultrasonic Test System. *Can. Geotech. J.*41, páginas 844 a 860.
- Lima, C.; Menezes, J. E. (2008). *Textos de Apoio de Geologia de Engenharia*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Price, D.G., De Goeje, D. e Pool, M. (1978) - "Field instruments for engineering geology mapping". *Proc. 3rd Int. Cong. IAEG, Sec. IV, Vol. 2*, pp. 145-151, Madrid.
- Pundit Lab da Proceq (2010) – Link Software for PROCEQ Pundit. Version 2.1. © 2010 Proceq SA, All rights reservad
- Reis, R. Pena (1983) – "A sedimentologia de depósitos continentais. Dois exemplos do cretácico superior – Miocénico de Portugal" – Tese de Dout. Universidade de Coimbra, 404 p.
- Ribeiro, A.; Silva, J.B.; Dias, R.; Fonseca, P.; Kullberg, M. C.; Terrinha, P.; Kullberg, J. C. (1996) – "Tectonics of the Lusitanian Basian. Final Report". Proj. Milupobas, Contract nº JOU-CT94-0348, ICTE/GG/GeolFCUL, Lisboa, 126 p.
- Rocha, R.; Manupella, G.; Mouterde, R.; Ruget, C.; Zbyszewski, G (1981) – "Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000. Notícia explicativa da folha 19-C. Figueira da Foz". *Serviços Geológicos de Portugal*, Lisboa, 126 p.
- Rocha, R.; Marques, J. F; Soares, A. F. (1990) – "Les unités lithostratigraphiques du Bssin Lusitanein au Nord de l'accident de Nazaré (trias-Aaléniam)". *Cahiers Univ. Cathl. Lyon, ser., Sci. Lyon*, 4. Pp. 121.126.
- Santi, P. M. (1998) - "Improving the lar Slake, Slake Index and Slake Durability tests for Shales". *Environmental & Engineering Geoscience*. Vol. IV (3), pp. 385-396.
- Schmidt, E. (1951) - "A non-destructive concret tester". *Concrete*, 59 (8), pp.34-35.

- Serviços cartográficos do exército (2012) - Carta Militar de Portugal Série M888- Folha 230 – Coimbra. Esta Série Cartográfica constitui a principal produção do IGeoE e é a única cobertura completa do território continental na escala 1/25 000. Compreende um total de 632 folhas
- Soares, A. F.; Lapa, M. R.; Marques, J. F. (1986) – “Contribuição para o conhecimento da litologia das unidades meso-cenozóicas da Bacia Lusitaniana a Norte do “acidente” da Nazaré. Memórias e Notícias Publ. Mus. Lab. Minl. Geol., Univ. Coimbra, vol. 102, pp. 23-41.
- Soares, A. F.; Marques, J. F.; Rocha R. B. (1985) – “Contribuição para o conhecimento Geológico de Coimbra” Memórias e Notícias, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol., Univ. Coimbra, nº100.
- Soares, A. F.; Pena, R. P. (1984) – “Considerações sobre as unidades litostratigráficas pós-jurássicas na região do Baixo Mondego”. Livro de Homenagem a Orlando Ribeiro, Lisboa, pp. 183-202.
- Soares, A. F.; Rocha, R.B. (1984) – “Profil d’un Mntif pour une réflexion sur la sédimentation jurassique dans la bordure occidentale de Portugal”. *Cahiers Univ. Cathol. Lyon*, 4, pp. 225-264.
- Stacey, T. R.; Page, C. H. (1986) - *Practical handbook for underground rock mechanics*. Series on Rock and Soil Mechanics. Vol.12. Trans Tech Publications.
- Teixeira, C. (1981) - Geologia de Portugal, Pré-Câmbrico e Paleozóico. Vol. 1, Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa, 629 p.
- Vallejo, L. G.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C. (2002) – *Ingeniería Geológica*. Prentice Hall.
- Velho, J. L., Gomes, C. (1997) - A aplicação de Ultrassons na Caracterização de Corpos Rochosos: O Caso de Quartzitos. *Geociências, Rev. Univ. Aveiro*, Vol.11, Fasc.(1 e 2), páginas 171 a 179.

Sítios na Internet Consultados:

- NDT, Resource Center. Introduction to Ultrasonic Testing, acedido a Março de 2014: http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_ut_index.htm
- Proceq, acedido a Fevereiro de 2014: <http://www.proceq.com/po/produtos/teste-de-concreto/ultrasonic-testing.html>

ANEXOS

ANEXO I – RESULTADOS DOS ENSAIOS DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS.

Descrição	Velocidades das ondas P (m/s)			Velocidades das ondas S (m/s)	
	24 kHz	54 kHz	Média	250 kHz	
W1	T12	3051	3024	3038	2156
	T13B	3380	3303	3342	2312
	T16A	3734	3688	3711	2350
	T16B	3675	3679	3677	2541
	T17	3969	4074	4022	2292
	T18A	4036	3934	3985	2433
	T18B	3797	3842	3820	2025
	T18C	3724	3648	3686	2134
	T19	3481	3533	3507	2243
	T20	2714	3834	3274	1652
	T21A	3837	4090	3964	2283
	T21B	2550	3080	2815	1926
	T22A	3625	3821	3723	2238
	T22B	4225	4282	4254	2457
	T22C	3313	3418	3366	2020
	T23	3604	3705	3655	2131
	T24	2559	2720	2640	1609
	T25A	2571	2887	2729	1565
	T25B	4209	4395	4302	2939
	T26	4821	4932	4877	3000
	T107A	3551	3636	3594	2197
	T107B	4444	4444	4444	2569
	T110A	3048	3106	3077	1943
	T110B	2867	2974	2921	1928
	T111	2198	2292	2245	1990
	T112	2566	2644	2605	1645
T122A	4190	4310	4250	2419	
T122B	4310	4438	4374	2443	
T148	4138	4260	4199	2307	
T150	4497	4620	4559	2522	
T178A	4246	4368	4307	2289	
T178B	4134	4253	4194	2284	
T186	3592	3712	3652	2176	
W2	T15A	3089	3089	3089	2454
	T15B	3156	3092	3124	1838
	T15C	3231	3074	3153	1693
	T32	3438	3516	3477	1766
	T34	2961	3285	3123	1651
	T35A	3010	3359	3185	1562
	T35B	3534	3843	3688	1749
	T36	3304	3541	3423	1733
	T39A	2726	3022	2874	1518
	T39B	3371	3571	3471	2007

	T40	2363	2532	2448	1232
	T46	4187	4261	4224	2469
	T47	4093	4173	4133	2377
	T49A	3364	3586	3475	1982
	T49B	3398	3607	3503	2848
	T51	3040	3255	3148	1510
	T58	3456	3554	3505	2064
	T59	3354	3520	3437	1904
	T61	2801	2911	2856	1670
	T80	5000	5000	5000	2797
	T99A	2616	2714	2665	1515
	T99B	3231	3379	3305	1892
	T101	3451	3550	3501	2064
	T103	2829	3082	2956	1770
	T106	3264	3482	3373	1995
	T118A	5097	5097	5097	2556
	T118B	5085	5197	5141	2860
	T133A	5027	5097	5062	2622
W3	T9	2442	2634	2538	1625
	T30	3698	3901	3800	2540
	T52	3458	3627	3543	1779
	T53	2885	2925	2905	904
	T54A	2521	2539	2530	1424
	T54B	3640	3755	3698	2372
	T57	2280	2448	2364	1085
	T62	5302	5302	5302	2821
	T68	3419	3493	3456	1538
	T69	2362	2570	2466	1306
	T70	2411	2575	2493	1753
	T84	3502	3644	3573	1022
	T85	3392	3605	3499	910
	T86	2716	2940	2828	753
	T87A	3314	3482	3398	2137
	T87B	3321	3449	3385	1865
	T88	2930	3284	3107	1851
	T89	2415	2471	2443	982
	T94	2639	2825	2732	1412
	T96B	2685	2816	2751	1505
	T98	2855	2924	2890	1946
	T130	3275	3425	3350	2708
T131	3050	3110	3080	750	
T133B	4945	5085	5015	2774	

ANEXO II – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

W1			W2			W3		
Descrição do provete	Poisson ratio (ν)	E_d (GPa)	Descrição do provete	Poisson ratio (ν)	E_d (GPa)	Descrição do provete	Poisson ratio (ν)	E_d (GPa)
T13B	0,04	25,27	T15B	0,24	11,94	T9	0,15	8,74
T16A	0,17	22,72	T15C	0,30	9,30	T30	0,10	22,79
T16B	0,04	30,46	T32	0,33	9,71	T52	0,33	8,27
T17	0,26	19,18	T34	0,31	8,74	T53	0,45	1,77
T18A	0,20	23,26	T35A	0,34	7,42	T54A	0,27	5,80
T18B	0,30	14,06	T35B	0,35	9,12	T54B	0,15	18,68
T18C	0,25	16,88	T36	0,33	9,33	T57	0,37	2,91
T19	0,15	20,98	T39A	0,31	7,38	T62	0,30	21,69
T20	0,33	9,02	T39B	0,25	13,98	T68	0,38	5,76
T21A	0,25	19,22	T40	0,33	4,70	T69	0,31	4,63
T21B	0,06	17,19	T46	0,24	21,39	T70	0,01	11,87
T22A	0,22	19,33	T47	0,25	19,50	T84	0,46	2,22
T22B	0,25	22,33	T49A	0,26	13,45	T85	0,46	1,74
T22C	0,22	15,72	T51	0,35	6,84	T86	0,46	1,19
T23	0,24	16,96	T58	0,23	15,07	T87A	0,17	14,76
T24	0,20	10,15	T59	0,28	12,08	T87B	0,28	9,76
T25A	0,25	8,99	T61	0,24	9,79	T88	0,22	10,38
T25B	0,06	39,92	T80	0,27	26,30	T89	0,40	2,25
T26	0,20	35,69	T99A	0,26	7,83	T94	0,32	5,31
T107A	0,20	19,00	T99B	0,26	12,30	T96B	0,29	6,32
T107B	0,25	24,43	T101	0,23	15,09	T98	0,08	13,54
T110A	0,17	15,48	T103	0,22	11,28	T131	0,47	1,17
T110B	0,11	16,24	T106	0,23	14,14	T133B	0,28	21,66
T112	0,17	11,09	T118A	0,33	20,16			
T122A	0,26	21,33	T118B	0,28	27,36			
T122B	0,27	21,38	T133A	0,32	21,71			
T148	0,28	18,79						
T150	0,28	22,59						
T178A	0,30	18,00						
T178B	0,29	18,28						
T186	0,22	18,09						
Média	0,21	19,74		0,28	13,30		0,29	8,83
Desvio padrão	0,08	6,67		0,04	5,93		0,13	6,87
Mínimo	0,04	8,99		0,22	4,70		0,01	1,17
Máximo	0,33	39,92		0,35	27,36		0,47	22,79

ANEXO III - RESULTADO DA CLASSIFICAÇÃO RMR PARA A SONDAGEM 3 NO LABORATÓRIO CHIMICO

Laboratório Chimico - Sondagem 3			
	Parâmetro	Descrição/resultados	Peso
De 1,4 a 2,8 m 1ª Secção	1	13 MPa	1,5
	2	40%	9
	3	F4	7
	4	Superfícies muito rugosas, com alguma alteração 12+8	20
	5	Sem presença de água	15
	Total		
De 2,8 a 3,50 m 2ª Secção	1	53 MPa	5
	2	55%	13
	3	F4/F3	9
	4	Superfícies rugosas, pouca alteração 11+13	24
	5	Sem água	15
	Total		
De 3,7 a 6,6 m 3ª Secção	1	63 MPa	5,5
	2	90%	19
	3	F3/F4	10
	4	Superfícies muito rugosas, sem alteração 13+13	26
	5	Sem presença de água	15
	Total		
De 6,6 a 7,70 m 4ª Secção	1	15 MPa	1,5
	2	90%	19
	3	F3/F4	8
	4	Muito rugosas, muito alteradas 13+4	17
	5	Sem presença de água	15
	Total		
Média			63,63

ANEXO IV - RESULTADO DA CLASSIFICAÇÃO RMR PARA A SONDAGEM 1 NO COLÉGIO DA TRINDADE

Colégio da Trindade - Sondagem 1			
	Parâmetro	Descrição/resultados	Peso
De 0,60 a 2,20 m 1ª Secção	1	56 MPa	5
	2	75%	15
	3	F4/F5	6
	4	Superfícies rugosas, pouca alterada 11+13	24
	5	Sem presença de água	15
	Total		
De 2,20 a 3,95 m 2ª Secção	1	57 MPa	5
	2	90%	19
	3	F3/F4	11
	4	Superfícies rugosa, pouco alterada 11+13	24
	5	Sem presença de água	15
	Total		
Média			69,5

ANEXO V - RESULTADO DA CLASSIFICAÇÃO RMR PARA A SONDAGEM 2 NO COLÉGIO DA TRINDADE

Colégio da Trindade - Sondagem 2			
	Parâmetro	Descrição/resultados	Peso
De 4,50 a 5,60 m 1ª Secção	1	30 MPa	3
	2	81%	17
	3	F4	11
	4	Superfícies rugosas, alterada 11+13	24
	5	Sem presença de água	15
	Total		
De 5,60 a 6,50 m 2ª Secção	1	21 MPa	2
	2	81%	17
	3	F3/F4/F5	8
	4	Superfícies muito rugosa, alguma alteração 11+9	20
	5	Sem presença de água	15
	Total		
De 6,50 a 7,50 m 3ª Secção	1	45 MPa	4
	2	93%	19
	3	F2	14
	4	Superfícies rugosas, pouco alteradas 12+12	24
	5	Sem presença de água	15
	Total		
Média			69

ANEXO VI - RESULTADO DA CLASSIFICAÇÃO RMR PARA A SONDAGEM 4 NA FACULDADE DE FARMÁCIA

Faculdade de Farmácia - Sondagem 4			
	Parâmetro	Descrição/resultados	Peso
De 1,55 a 2,60 m	1	33 MPa	3
	2	85%	17
	3	F4	8
	4	Superfícies muito rugosas, alterada 13+7	20
	5	Sem presença de água	15
	Total		
De 2,60 a 6,00 m	1	33 MPa	3
	2	93%	19
	3	F2/F3	11
	4	Superfícies muito rugosa, pouco alterada 13+13	26
	5	Sem presença de água	15
	Total		
De 6,00 a 8,05 m	1	33 MPa	3
	2	92%	19
	3	F3/F4	10
	4	Superfícies muito rugosas a rugosas, pouco a alguma alteração 12+12	24
	5	Sem presença de água	15
	Total		
Média			65,25