

A Nossa
Universidade

Colégio dos Jesuítas
Rua dos Ferreiros - 9000-082, Funchal

Tel: +351 291 209400
Fax: +351 291 209410
Email: gabinetedareitoria@uma.pt

DM

Caracterização Geomecânica e Classificações
RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de Maciços
Rochosos em Taludes do Funchal
Sílvio Bruno Nóbrega Freitas



Caracterização Geomecânica e Classificações
RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de Maciços
Rochosos em Taludes do Funchal

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Sílvio Bruno Nóbrega Freitas
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL


UNIVERSIDADE da MADEIRA
A Nossa Universidade
www.uma.pt

Setembro | 2011

DIMENSÕES: 45 X 29,7 cm

PAPEL: COUCHÊ MATE 350 GRAMAS

IMPRESSÃO: 4 CORES (CMYK)

ACABAMENTO: LAMINAÇÃO MATE

NOTA*

Caso a lombada tenha um tamanho inferior a 2 cm de largura, o logótipo institucional da Uma terá de rodar 90°, para que não perca a sua legibilidade/identidade.

Caso a lombada tenha menos de 1,5 cm até 0,7 cm de largura o layout da mesma passa a ser aquele que consta no lado direito da folha.



Caracterização Geomecânica e Classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de Maciços Rochosos em Taludes do Funchal

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Sílvia Bruno Nóbrega Freitas

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTAÇÃO

Domingos Rodrigues

CO-ORIENTAÇÃO

Alexandre Tavares

Perseverantia omnia Vincit

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é o resultado de cerca de um ano de trabalho. Durante este período, diversas pessoas contribuíram, a diferentes níveis e de forma decisiva, para a sua realização, merecendo por isso o meu sincero agradecimento:

- À minha família, pelo apoio moral, incentivo e pelos esforços a que se propuseram para que conseguisse a minha formatura.
- Ao meu orientador, Prof. Domingos Rodrigues, cuja colaboração, orientação e disponibilidade foram um grande contributo na elaboração desta dissertação.
- Ao meu co-orientador, cujo fornecimento de informação e as correcções sugeridas à dissertação, proporcionaram um maior enriquecimento ao texto final.
- Aos meus colegas e amigos, pelo companheirismo, momentos vividos e que partilharam comigo a evolução desta dissertação.
- A todos os autores e investigadores que, com o seu trabalho, contribuíram para um melhor conhecimento do tema e para o desenvolvimento de todo este trabalho.

A todos aqueles que, de forma directa ou indirecta, contribuíram para a concretização deste estudo e que não foram aqui referidos, para eles deixo aqui também uma palavra de apreço.

A todos, o meu Obrigado!

Caracterização Geomecânica e Classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de Maciços Rochosos em taludes do Funchal

RESUMO

Conhecer a natureza e as características geomorfológicas e geológicas, que potenciam situações de instabilidade, é um passo importante a fim de determinar as medidas de prevenção e de estabilização, que se podem adaptar a um determinado local.

Várias situações de instabilidade, que não se compreendem numa observação expedita e que ocorrem nos taludes do Funchal, despertaram o interesse de realizar um trabalho profundo, centrado na avaliação dos processos de instabilidade do talude.

Na caracterização dos maciços rochosos para obtenção do índice RMR (Bieniawsky), fez-se um levantamento das descontinuidades com caracterização espacial do preenchimento e rugosidade. A resistência dos maciços rochosos e avaliação da resistência à compressão uniaxial dos taludes foi conseguido através de vários ensaios *in situ*, utilizando o martelo de Schmidt.

Identificaram-se os possíveis factores que podem estar na base da instabilidade do talude. Dos resultados que se obtiveram, destacam-se a geometria do talude, as propriedades geomecânicas, a distribuição das descontinuidades, a influência da vegetação e da água. Os resultados permitiram propor medidas de prevenção e estabilização do talude, conforme os resultados da classificação geomecânica SMR (Slope Mass Rating) de Romana.

Por fim, estabeleceu-se a comparação dos diferentes resultados obtidos com resultados publicados, sobre o mesmo tipo de material para a Ilha da Madeira.

PALAVRAS – CHAVES

- Instabilidade de taludes
- Descontinuidades
- Esclerómetro de Schmidt
- Maciço rochoso
- Classificação geomecânica RMR e SMR
- Medidas de estabilização

ABSTRACT

Knowing the nature and the characteristics of the geological and geomorphological features, situations that foster instability, is an important step to determine the measures of prevention and stabilization, which can adapt to a particular site.

Several situations of instability, that doesn't include an observation expeditiously and that occur on the slopes of Funchal, aroused the interest of performing a thorough work, centered on the evaluation of slope instability processes.

In the characterisation of rock masses to obtain the RMR index (Bieniawsky) it was a survey was done to characterise spatial discontinuities of the filling and roughness. The resistance of rock masses and evaluation of the uniaxial compressive strength of the slopes has been achieved through in situ testing using the Schmidt hammer.

Identified were the possible factors that may underline the instability of the slope. From the results that were obtained at work, highlighted was the geometry of the slope, the geo-mechanical properties, the distribution of discontinuities, the influence of vegetation and water. The results permitted to take actions of prevention and stabilisation of the slope, according to the results of the geomechanical classification SMR (Slope Mass Rating) of Romana.

Finally, it was established to compare from the different results obtained with published results on the same type of material to the island of Madeira.

KEYWORDS

- Slope instability
- Discontinuities
- Schmidt rebound hammer
- The rock mass
- SMR and RMR geomechanics classification
- Stabilization measures

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE EQUAÇÕES	xi
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xiii
1 Introdução.....	1
2 Enquadramento Regional	5
2.1 História Geológica da Ilha da Madeira.....	5
2.2 Evolução Geológica da Ilha da Madeira.....	7
2.3 Estrutura Interna das Lavas.....	11
2.4 Enquadramento Climático	14
2.5 Enquadramento Hidrográfico	15
2.6 Considerações Finais	16
3 Revisão Bibliográfica	17
3.1 Ensaios de Caracterização de Maciços Rochosos.....	17
3.1.1 Ensaio com martelo de Schmidt (Clássico tipo N)	17
3.1.2 Ensaio de compressão Simples ou Uniaxial.....	25
3.2 Considerações Finais	28
4 Metodologia de Trabalho.....	29
4.1 Classificações Geomecânicas	29
4.1.1 Classificação de Bieniawski ou Sistema RMR (Rock Mass Rating).....	31
4.1.2 Classificação Geomecânica de Romana (Slope Mass Rating)	39
4.2 Caracterização Geomecânica de Maciços Rochosos.....	44
4.2.1 Propriedades de Resistência e Descontinuidades.....	45
4.2.2 Propriedades Físicas e Mecânicas das Rochas	52
4.3 Considerações Finais	56
5 Estabilidade de maciços rochosos.....	57

Caracterização Geomecânica e Classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de Maciços Rochosos em taludes do Funchal

5.1	Classificação dos Tipos de Movimentos de Vertente.....	57
5.2	Tipos de Instabilidade de Vertente.....	58
5.2.1	Desprendimentos (Rock Fall).....	60
5.2.2	Deslizamentos.....	61
5.2.3	Rotura por “Toppling”/Basculamento.....	64
5.2.4	Movimentos Complexos e Compostos	65
5.3	Medidas de Estabilização de Taludes.....	65
5.3.1	Modificação da Geometria do Talude;.....	67
5.3.2	Sistemas de Drenagem	68
5.3.3	Reforço da Resistência do Talude;.....	68
5.3.4	Medidas de protecção superficial	72
5.4	Considerações Finais	74
6	Análise dos Resultados	75
6.1	Localização das Amostras.....	75
6.2	Caracterização dos Taludes Estudados (Descrição Geológica)	77
6.3	Caracterização dos Parâmetros das Classificações Geomecânicas.....	80
6.3.1	Resistência do Material Rochoso	80
6.3.2	Determinação do Valor do RQD e do Espaçamento	81
6.3.3	Características das Descontinuidades.....	83
6.3.4	Presença de Água.....	85
6.4	Aplicação da Classificação RMR e SMR.....	86
6.4.1	Classificação RMR.....	86
6.4.2	Classificação SMR	89
6.5	Medidas de Estabilidade.....	92
6.6	Considerações Finais	93
7	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	xv
	ANEXO I	xxi

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Perfil da Madeira visto de Este (Rodrigues, 2005)	8
Figura 2.2: Geologia da Ilha da Madeira (Zbyszewski, et al., 1975)	8
Figura 2.3: (A) Disjunção colunar irregular e em laje no talude da Achada e (B) corte completo de um maciço rochoso (Fonte: earth-of-fire.over-blog.com).....	12
Figura 3.1: Relação entre o valor estimado (R_c) e R para o tamanho da amostra superior a 11 cm (Demirdag, et al., 2009)	21
Figura 3.2: Variação do valor do ressalto durante os dois primeiros impactos de acordo com o grau de meteorização da superfície de impacto (Aydin, et al., 2005)..	23
Figura 3.3: Relação entre compressão uniaxial e número de ressalto do martelo de Schmidt (N) (Aggistalis, et al., 1996).....	25
Figura 4.1: Ábaco de Deere, <i>et al.</i> , (1966) para a determinação da resistência à compressão	37
Figura 4.2: Orientação da descontinuidade onde α é a direcção do mergulho e β o mergulho (Ferrer, 2002).....	46
Figura 4.3: Perfis típicos de rugosidade e respectivas classificações (ISRM, 1981)..	49
Figura 5.1: Desmoronamento de rochas (Fonte: landslides.usgs.gov)	60
Figura 5.2: Geometria de uma ruptura por escorregamento segundo estruturas planar (adaptado por (Hoek, et al., 1981))	62
Figura 5.3: Ruptura por <i>toppling</i> (Fonte: landslides.usgs.gov).....	64
Figura 6.1: Localização dos taludes em estudo (Fonte: Google Earth)	75
Figura 6.2: Vista geral sobre os taludes (A) Achada e (B) Peugeot	76
Figura 6.3: (A) maciço do talude da Peugeot e (B) maciço do talude da Achada.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Classificação da alteração do maciço rochoso de acordo Geological Society (London) Engineering Group Working Party 1977. (Aggistalis, et al., 1996)	22
Tabela 4.1: Classificações geomecânica RMR (adaptação de Bieniawski (1989))	32
Tabela 4.2: Correção relacionada com a orientação das descontinuidades (adaptado de Bieniawski (1989)).	33
Tabela 4.3: Classificação dos maciços rochosos de acordo com o RMR (adaptado de Bieniawski, (1989))	34
Tabela 4.4: Classificação proposta pela ISRM, que em função do grau de qualidade da rocha, correlaciona a resistência à compressão simples (σ_c) com o comportamento do material face àquelas análises expeditas. (Lima, et al., 2008)	36
Tabela 4.5: Classificação da qualidade do maciço rochoso de acordo com os valores do RQD (Deere, et al., 1966).	38
Tabela 4.6: Factor de ajuste segundo o método de escavação (F4) (Hudson, 1993)	41
Tabela 4.7: Classificação Geomecânica SMR (adaptado de Romana, (1996)) factor de ajustamento para a orientação das descontinuidades (F1, F2, F3)	41
Tabela 4.8: Classificação da estabilidade (adaptado de Romana, (1996))	42
Tabela 4.9: Valor SMR para diferentes tipos de rotura e respectivos métodos de suporte (Romana, et al., 2003)	43
Tabela 4.10: Classificação do espaçamento das descontinuidades (ISRM, 1981)	47
Tabela 4.11: Classificação da espessura das camadas (ISRM, 1981)	47
Tabela 4.12: Descrição das descontinuidades (ISRM, 1981)	48
Tabela 4.13: Classificação da abertura das descontinuidades (ISRM, 1981)	50
Tabela 4.14: Descrição de presença de água nas descontinuidades (adaptada ISRM, 1981)	52
Tabela 4.15: Classificação de maciços rochosos pelo número de famílias de descontinuidades (ISRM, 1981)	53
Tabela 4.16: Descrição do tamanho do bloco em função do número de descontinuidades (ISRM, 1981)	54

Tabela 4.17: Classificação de maciços rochosos em função do tamanho e forma dos blocos (ISRM, 1981).....	55
Tabela 5.1: Classificação da velocidade de movimentos nos taludes	58
Tabela 5.2: Classificação dos movimentos nos taludes em termos da profundidade máxima da superfície de rotura.	58
Tabela 6.1: Descrição do talude da Achada.....	77
Tabela 6.2: Descrição do talude da Peugeot	78
Tabela 6.3: Espaçamento das descontinuidades do talude da Achada	82
Tabela 6.4: Espaçamento das descontinuidades do talude da Peugeot.....	83
Tabela 6.5: Caracterização do maciço rochoso do talude da Achada	84
Tabela 6.6: Caracterização do maciço rochoso do talude da Peugeot.....	85
Tabela 6.7: Condições de percolação do talude da Peugeot.....	86
Tabela 6.8: Valores ponderais dos parâmetros de RMR para o talude da Achada	87
Tabela 6.9: Valores ponderais dos parâmetros de RMR para o talude da Peugeot.....	87
Tabela 6.10: Factores de correcção para o talude da Achada.....	88
Tabela 6.11: Factores de correcção para o talude da Peugeot	88
Tabela 6.12: Caracterização factor F1 para o talude da Achada.....	89
Tabela 6.13: Caracterização factor F2 para o talude da Achada.....	90
Tabela 6.14: Caracterização factor F3 para o talude da Achada.....	90
Tabela 6.15: SMR obtido para rotura por basculamento e planar para o talude da Achada	90
Tabela 6.16: Caracterização factor F1 para o talude da Peugeot	91
Tabela 6.17: Caracterização factor F3 para o talude da Peugeot	91
Tabela 6.18: SMR obtido para rotura por basculamento e planar para o talude da Peugeot	92

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 3.1	25
Equação 3.2	27
Equação 3.3	28
Equação 4.1	38
Equação 4.2	39
Equação 4.3	39
Equação 4.4	40
Equação 4.5	40
Equação 4.6	54
Equação 4.7	54

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABREVIATURAS

- $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Datação Argônio-Argônio. Usada para datar Rochas Ígneas
- ASTM American Society for Testing and Materials
- ISRM International Society for Rock Mechanics
- RMR Rock Mass Rating. Classificação de Bieniawsky
- RQD Rock Quality Designation
- SMR Slope Mass Rating. Classificação geomecânica de Romana
- UCS ou σ Resistência à compressão simples
- PVC Cloreto de polivinila/plástico não 100% originário do petróleo

NOTAÇÃO ROMANA

- A Área de secção transversal do provete
- cm Centímetros
- CO₂ Dióxido de carbono
- e Valor médio do espaçamento das famílias de descontinuidades
- E_y Módulo de young
- E Este
- EC7 Eurocódigo 7
- H Altura total do talude
- l_b Dimensões médias dos blocos
- J_v Índice do Numero de descontinuidades por unidade de volume
- kN Quilonewton
- kN/m³ Quilonewton por metro cubico
- km Quilometro
- km² Quilometro quadrado
- m Metro
- m/ano Metro por ano
- m/h Metro por hora

Caracterização Geomecânica e Classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de Maciços Rochosos em taludes do Funchal

▪ m/mês	Metro por mês
▪ m/min	Metros por minuto
▪ m/s	Metro por segundo
▪ Ma	Milhões de anos
▪ mol/ano	Moles por ano
▪ mm	Milímetros
▪ mm/ano	Milímetro por ano
▪ MPa	Mega Pascais
▪ N	Norte
▪ NE	Noroeste
▪ n_j	Número de descontinuidades
▪ °C	Graus centígrados
▪ R	Valor do ressalto do martelo de Schmidt
▪ R_c	Valor do ressalto do martelo de Schmidt (estimado)
▪ SE	Sudeste
▪ ton/ancoragem	Toneladas por ancoragem
▪ W_r	Carga de rotura do provete
▪ W	Oeste
▪ Weath	Grau de meteorização
▪ Z	Profundidade da fenda de tracção
▪ Z_w	Profundidade da água na fenda de tracção

NOTAÇÃO GREGA

▪ α_j	Valores dos ângulos das direcções de pendor da descontinuidade
▪ α_s	Valores dos ângulos das direcções de pendor do talude
▪ β_j	Ângulo de pendor da descontinuidade.
▪ ϕ	Ângulo de atrito interno
▪ ψ	Pendor da face do talude
▪ ψ_c	Pendor da cunha formada pelo plano de deslizamento

1 INTRODUÇÃO

Pode-se descrever um edifício, falando somente das qualidades dos materiais empregues na sua construção. Também se pode descrever o mesmo edifício, referindo-se quase unicamente à maneira como foi construído e à sua forma.

Do mesmo modo, pode-se descrever a formação geológica da Madeira sem descrever minuciosamente os materiais que nela entram, atendo-se principalmente ao seu mecanismo e às formas daí resultantes (Grabham, 1948).

Sendo a Ilha da Madeira caracterizada por uma morfologia muito acidentada, e tendo em conta o desenvolvimento dos conceitos de planeamento e de protecção do ambiente, tal como a segurança e a economia de meios e materiais, que levam a uma crescente necessidade de ocupar locais de características mais desfavoráveis, torna-se indispensável uma boa caracterização geológica-geotécnica, a fim de se prever o seu comportamento para as diversas ocupações.

A realização desta monografia insere-se no âmbito do Mestrado em Engenharia Civil, tendo sido proposto a realização de estudos, na área temática da caracterização geomecânica de maciços rochosos e validação dos processos de instabilização, recorrendo às classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana).

O desenvolvimento do presente estudo e as considerações geotécnicas tomadas a este nível foram genericamente baseadas nas observações de campo, no reconhecimento geológico de superfície e numa pesquisa bibliográfica, nomeadamente a Carta Geológica da Madeira e respectiva notícia explicativa.

Os movimentos de vertentes e de taludes constituem uma prova do carácter dinâmico do meio geológico e da evolução natural do relevo. A estabilidade de taludes tem relevância significativa na área da Geotecnia. Os fenómenos de instabilidades de taludes podem provocar acidentes, que causam perdas humanas e materiais, de consequências graves.

A descrição da qualidade de um maciço, especialmente de um maciço rochoso, inclui por sistema, a análise das características das discontinuidades ocorrentes nesses locais. Em termos práticos uma discontinuidade é qualquer entidade geológica que

interrompe a continuidade física de uma dada formação, em que a resistência é nula ou muito baixa.

A resistência dos maciços rochosos é afectada pela frequência e orientação de famílias de descontinuidades ou fracturas. A grande importância das descontinuidades é que elas irão influenciar as propriedades geomecânicas dos maciços rochosos relativos à resistência, deformabilidade e permeabilidade.

Deve conhecer-se a natureza e as características das formações geológicas, bem como os mecanismos que levam à instabilidade dos taludes, a fim de se poder adoptar medidas de estabilização que garantam as condições de segurança dos mesmos (Ortigão, et al., 2004).

Nesta dissertação efectua-se um estudo sobre as condições de estabilidade na área da Achada e na zona da Ribeira de João Gomes, no talude adjacente, habitualmente caracterizado como talude da Peugeot. Na área do trabalho, destacam-se as situações de instabilidade e a presença de fracturas que se observam nos afloramentos rochosos que constituem o talude, bem como o declive deste.

1.1 OBJECTIVOS E ESTRUTURA

O trabalho realizado e cujo tema é “Caracterização Geomecânica e Classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de Maciços Rochosos em taludes do Funchal” foi desenvolvido de modo a alcançar os seguintes objectivos:

- Caracterização geológica e estrutural das formações geológicas que constituem o talude.
- Avaliação da resistência à compressão uniaxial utilizando ensaios *in situ* com o esclerómetro de Schmidt.
- Aplicação de classificações geomecânicas, como a Rock Mass Rating e a Slope Mass Rating, que podem ser utilizadas na avaliação de situações de instabilidade.
- Avaliação dos principais tipos de movimentos de instabilidade que podem ocorrer no talude em estudo.
- Definição de medidas de prevenção e de estabilização que se podem adaptar ao local em estudo.

Para dar cumprimento aos propósitos enunciados, esta monografia possui uma estrutura em sete capítulos, com uma divisão capitular que pretende estabelecer uma sequência lógica entre os diversos temas abordados, de modo a não descuidar a complexidade e o carácter globalizante da área em estudo, e permitir um desenvolvimento coerente e estruturado da dissertação.

Deste modo, o presente estudo encontra-se organizado da seguinte forma, apresentando-os de modo sucinto:

- O Capítulo I, a Introdução, tem por objectivo desenvolver alguns elementos contextuais relativamente ao estudo em questão, enunciando-se os objectivos que se pretende atingir e a localização da área de estudo. Numa segunda parte, é descrito a organização da dissertação;
- No Capítulo II, Enquadramento Regional, procurou-se fazer a história e evolução geológica da Ilha da Madeira, o seu enquadramento climático e o hidrográfico;
- No Capítulo III, Revisão Bibliográfica, faz referência ao estado actual do conhecimento, auxiliando futuramente no desenvolvimento de novos conceitos e paradigmas;
- No Capítulo IV, Metodologia de Trabalho, procedeu-se à definição de forma simplificada das metodologias utilizadas na execução dos objectivos propostos;
- No Capítulo V, Estabilidade de maciços rochosos, procurou-se classificar os tipos de instabilidade de vertente e suas medidas de estabilização;
- No Capítulo VI, Análise dos Resultados, apresentam-se os resultados obtidos da caracterização dos taludes e possível discussão de resultados e medidas de estabilização. Por meio de comparação, procurou-se enquadrar os valores obtidos com estudos feitos anteriormente.
- No Capítulo VII, Conclusão, elabora-se uma síntese, onde pretende-se efectuar um balanço, tanto da pertinência como do método escolhido, bem como dos resultados obtidos na área em estudo e possíveis sugestões para trabalhos futuros.

2 ENQUADRAMENTO REGIONAL

A Ilha da Madeira está localizada no Oceano Atlântico. Possui uma área de cerca de 737 km² (com um comprimento de 63 por 23 km de largura máxima) e uma orografia muito acidentada. Tem uma altitude máxima em torno dos 1860 m (na zona leste no Pico do Areeiro e do Pico Ruivo em Santana) e entre os 1400 – 1500 metros no Paul da Serra, no lado ocidental (Ponta do Sol).

Tal como grande parte das regiões de origem vulcânica, a Ilha da Madeira, possui em termos geológicos-geotécnicos, características únicas, provocadas sobretudo pelos vários períodos de actividade vulcânica, que conduziram à formação da ilha com a configuração actual.

A heterogeneidade das regiões vulcânicas faz com que seja importante obter um grau razoável de conhecimento das suas estruturas geológicas, antes da implantação e dimensionamento de obras subterrâneas. Estabelece, também, a necessidade de um acompanhamento constante durante a execução da obra.

2.1 HISTÓRIA GEOLÓGICA DA ILHA DA MADEIRA

Muitos têm sido os autores que, durante o século XX, têm vindo a se debruçar sobre os mais variados aspectos da geologia da Madeira, tendo sido publicado em 1975, a primeira carta geológica na escala de 1/50000, de Zbysewski, editada pelos serviços geológicos de Portugal (Zbyszewski, et al., 1975).

Na ilha da Madeira, as rochas vulcânicas, na sua maioria básicas, constituem em superfície e em volume a quase totalidade da parte emersa da ilha, mais de 98% do material aflorante, condicionando fortemente a sua morfologia. As rochas vulcânicas presentes na Madeira são alcalinas. Trata-se de basaltos alcalinos e basanitos não tendo as rochas intermédias expressão significativa (Mata, 1996).

A área em estudo foi caracterizada de acordo com a Notícia Explicativa da Carta Geológica da Madeira. Do ponto de vista geológico, é representada por um longo período de tempo que engloba três épocas de intenso vulcanismo, separadas por fases de actividade vulcânica nula ou reduzida, durante os quais o edifício vulcânico sofreu forte erosão.

A ilha da Madeira teve origem há mais de 5,2 milhões de anos, em erupções que ocorreram pela ascensão de magma proveniente duma pluma térmica (hot-spot), localizada no manto subjacente à placa tectónica Africana. A ilha então formada atingia dimensões consideráveis, a nível de área e altitude, apesar do peso exercido sob a placa oceânica pelo material vulcânico combinado com a remoção de material em profundidade, ter provocado o afundamento da ilha (Mata, 1996).

Mata (1996) apresentou um modelo vulcano-estratigráfico, baseado sobretudo em datações geocronológicas e partindo do modelo apresentado por (Zbyszewski, et al., 1975), que definia cinco complexos vulcânicos principais. No entanto, Mata (1996) considerou que na altura o estado do conhecimento vulcano-estratigráfico não permitia a individualização de tantos complexos vulcânicos principais. Nesse contexto e face à informação disponível, Mata (1996) faseou a evolução da ilha da Madeira em três etapas fundamentais:

A fase pós-emersão (> 2,5 Ma), correspondente à fase de transição do vulcanismo submarino para a fase subaérea. É uma fase caracterizada fundamentalmente, por erupções de carácter explosivo, ainda que, na fase final, tenha coincidido com um incremento da produção lávica.

Na fase de consolidação insular (2,5 Ma a 1.0 Ma), a produção lávica terá atingido o seu auge, tendo o edifício vulcânico chegado a dimensões muito parecidas das actuais. O declinar da actividade vulcânica no final desta fase, levou os processos erosivos a desgastarem o edifício vulcânico e a moldaram os vales profundos.

Relativamente à fase matura (<1,0 Ma), Mata (1996) adianta que o vulcanismo passou a ter um carácter muito localizado, levando progressivamente ao declínio da actividade vulcânica.

Tendo em conta datações de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ das rochas vulcânicas do Arquipélago da Madeira e com base no modelo de Zbyszewski *et al.* (1975), (Geldmacher, et al., 2000) propõe um mapa geológico esquemático onde as formações vulcânicas da Ilha da Madeira pertencem a três unidades, a Basal (β_1), Intermédia (β_2 - β_4) e a Superior (β_5).

Na Madeira, a Unidade Basal (Miocénico Superior - Pliocénico) é constituída, maioritariamente, por depósitos piroclásticos e brechas vulcânicas, sendo as escoadas lávicas claramente secundárias, (correspondendo a formação β_1 de

(Zbyszewski, et al., 1975)). Localmente, esta unidade é interceptada por uma densa rede filoniana, sobretudo na parte central da ilha.

Após uma longa pausa na actividade vulcânica, a Unidade Intermédia foi composta, fundamentalmente, por escoadas lávicas basálticas (alcalinas) do Pliocénico até ao Pleistocénico, correspondendo às unidades β 2-4 de Zbyszewski. Esta Unidade Intermédia cobre toda a ilha, com sequências de lavas de mais de 500 metros de espessura, interceptadas pontualmente por filões subverticais (Weijden, et al., 2003).

A Unidade Superior (correspondente à unidade β 5) é composta por cones vulcânicos e por escoadas lávicas recentes que ocupam o interior dos vales (intracanyon).

Num estudo de cartografia e vulcano-estratigrafia preliminar da Ilha Madeira, (Prada, et al., 2000), definiram sete unidades geológicas, as quais, foram dispostas de acordo com a sua posição estratigráfica, das mais antigas para às mais recentes: o Complexo Vulcânico Base (CA); os Calcários Marinhos dos Lameiros (CM); o Depósito Conglomerático-Brechóide (CB); o Complexo Vulcânico Principal (CP); o Complexo Vulcânico de S. Roque/Paul (SRP); os Episódios Vulcânicos Recentes (VR) e as Formações Sedimentares (Depósitos de vertente (dv), fajãs (fj), quebradas (q), depósitos de enxurrada recente (dr), areias de praia (ap), dunas fósseis (df), terraços (t) e aluviões (a)). Esta definição teve por base, um conhecimento vulcano-estratigráfico, e de dados existentes de geocronologia absoluta.

2.2 EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DA ILHA DA MADEIRA

A evolução geológica e geomorfológica das ilhas do Arquipélago da Madeira é resultante da forma inicial e da sua evolução, da estrutura e idade da ilha, da sua litologia, dos seus materiais e respectiva disposição, do tipo e intensidade dos agentes erosivos, próprios da sua localização geográfica.

O clima, a precipitação, que influenciam o desenvolvimento da rede hidrográfica, e a acção das vagas sobre o litoral são os principais agentes erosivos. A forma da Ilha da Madeira é característica com um declive muito suave (Figura 2.1), devido a acumulação maioritária de escoadas basálticas muito fluidas, que podem percorrer dezenas de quilómetros a partir do centro da erupção.

Na parte emersa do edifício vulcânico da Madeira, o ponto mais alto da ilha é o Pico Ruivo em Santana com 1862 m. A altitude média da ilha é de 650 m e 51% da área da ilha está situada entre os 200 e 400 m de altitude e 20 % entre os 1000 e 1600 metros. A ilha do ponto de vista geomorfológico pode dividir-se em três unidades: o Paul da Serra, Maciço Vulcânico Central e Ponta de S. Lourenço.

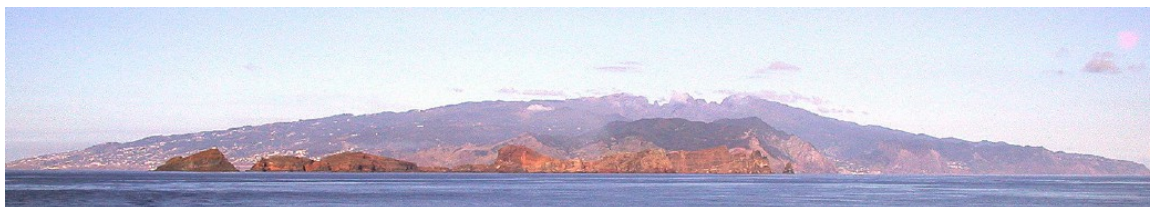


Figura 2.1: Perfil da Madeira visto de Este (Rodrigues, 2005)

O Maciço Vulcânico Central está limitado a ocidente pela divisória constituída pelo vale da Ribeira Brava, S. Vicente e a oriente, pela Ponta de S. Lourenço. É no maciço vulcânico central que se encontram os pontos mais altos da ilha.

Segundo a carta geológica da Madeira (Zbyszewski, et al., 1975), foram evidenciados cinco complexos vulcânicos principais e sucessivos como mostra a Figura 2.2:

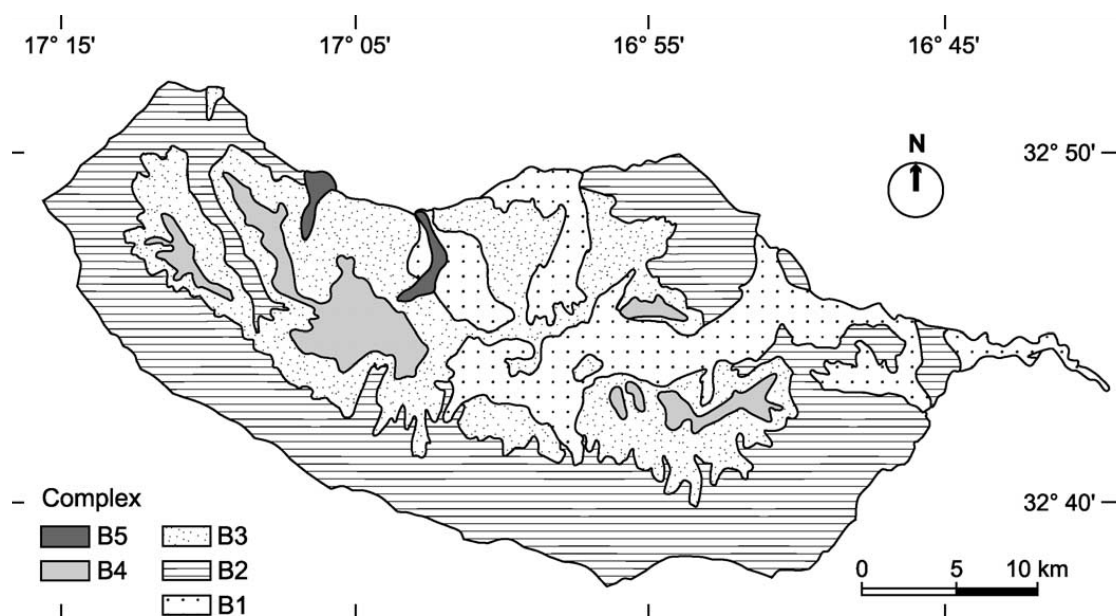


Figura 2.2: Geologia da Ilha da Madeira (Zbyszewski, et al., 1975)

A vulcano-estratigrafia e a cartografia geológica, mostram que o aparelho vulcânico, evoluiu por sucessivas fases de intensa actividade geológica vulcânica, separados

por longos períodos de actividade muito atenuada ou de inactividade, durante as quais a erosão reduziu, por vezes consideravelmente, a dimensão do edifício.

Os processos erosivos foram promovidos predominantemente por incisão fluvial, pela abrasão marinha, com recuo da linha da costa e criação de arribas, e por processos gravíticos desencadeados pela criação de relevos íngremes pelos processos anteriores.

O nascimento da ilha no final do Miocénico foi relacionado com o vulcanismo intraplaca, em ambiente oceânico, representado por projecções grosseiras de piroclastos basálticos (complexo vulcânico de base $\beta 1$).

Após uma longa pausa na actividade vulcânica, um extenso e heterogéneo complexo (complexo vulcânico periférico $\beta 2$), foi formado onde materiais explosivos (piroclastos basálticos) e efusivos (lavas basálticas) se misturaram.

Após outra interrupção, um novo mas menos extenso complexo basáltico foi gerado, o complexo vulcânico das lombadas superiores $\beta 3$, onde derrames basálticos dominaram claramente sobre os materiais piroclásticos.

Posteriormente, o complexo $\beta 3$ foi coberto por espessos e compactos derrames basálticos, atribuídos ao vulcanismo fissural, formando o complexo basáltico do Paul da Serra ($\beta 4$). Recentemente, as últimas erupções preencheram os vales já existentes da zona noroeste da ilha, originando o complexo $\beta 5$ - escoadas modernas (Carvalho, et al., 1991).

Os complexos geológicos $\beta 1$ - $\beta 5$ são compostos, essencialmente, por basaltos, basanitoides, e com contribuições menores de hawaiites e mugearitos (Weijden, et al., 2003).

Estes complexos formam afloramentos, exposição de uma rocha na superfície da terra, sendo muito importante nos estudos geológicos, pois permitem a observação directa das rochas, além de permitir a colecta de amostras de modo a conhecer as características das rochas.

Durante os períodos de erosão intensa, foram escavados vales e criados relevos acidentados, que destruíram parcial ou totalmente as formas vulcânicas, enquanto, que os produtos da erosão se depositaram nos flancos imersos do grande vulcão ou no interior de vales.

2.2.1 METEORIZAÇÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS

Os principais problemas na geologia de engenharia estão relacionados com as características das descontinuidades e das propriedades e distribuição de materiais rochosos. A meteorização é uma deterioração não uniforme do maciço rochoso, que vai acrescentar mais complexidade a uma situação já de si complexa.

No estado inicial, o desgaste concentra-se nas descontinuidades. A princípio, apresenta-se por manchas no maciço e com o avanço da meteorização o maciço rochoso torna-se mais fraco. Pode-se argumentar que nos primeiros estágios de meteorização, os seus efeitos são mais significativos em problemas de engenharia relacionados com as descontinuidades. É sabido que a meteorização causa diferentes problemas de engenharia, dependendo da natureza original do maciço rochoso. A actual classificação de meteorização é baseada na impressão visual (Price, 1993).

O basalto pode abranger apenas uma pequena parte da superfície subaérea da terra, mas a sua resistência à meteorização relativamente alta, torna-o elementar no ciclo de CO₂. A meteorização pode ser estudada em função da mineralogia e/ou química da rocha “*fresh*” (Weijden, et al., 2003). Pode ainda ser estimada através da drenagem da água no basalto, com base nas taxas de erosão e consumo de CO₂.

Estimou-se segundo Dessert *et al.*, (2002), que o fluxo de CO₂ consumido pela meteorização química do basalto é de cerca de $4,08 \times 10^{12}$ mol/ano. O fluxo global de CO₂ consumido pela meteorização química dos basaltos representa entre 30 a 35% do fluxo total de silicato continental. A actividade vulcânica não só actua como uma fonte de CO₂ atmosférico importante, como cria também fortes perdas de CO₂ que não podem ser ignorados, para melhor entender a evolução geoquímica e climática da Terra (Navarre-Sitchler, et al., 2007).

Em caso de temperatura alta ou de enxurrada, são produzidas elevadas taxas de consumo de CO₂. Estes fluxos foram determinados a partir de diferentes relações simples entre o escoamento e a temperatura da superfície. Um aumento de consumo de CO₂ ou da taxa de meteorização reflecte um aumento da temperatura. A meteorização química das ilhas vulcânicas é importante e não negligenciável para o

ciclo do carbono. Foi considerado ainda que a vegetação e a topografia da ilha têm impacto na meteorização química do basalto (Dessert, et al., 2002).

Estes modelos podem ser influenciados pela poluição atmosférica e pela actividade agrícola, industrial e doméstica. Por esta razão devem ser utilizadas zonas inexploráveis invés de áreas povoadas para a obtenção de meteorização natural.

2.3 ESTRUTURA INTERNA DAS LAVAS

Ao arrefecer, as lavas sofrem uma forte contracção, uma vez que, o volume que ocupam quando solidificadas é menor do que quando se encontram no estado líquido. Este efeito de arrefecimento irá determinar uma reorganização da sua estrutura interna, originando sistemas de fracturas que se formam nas zonas de retracção, denominadas disjunções.

As colunas crescem normalmente perpendicularmente às superfícies de arrefecimento, em colunas e prismas (Grabham, 1948). Se o arrefecimento for rápido e irregular, as colunas podem não se formar podendo se quebrar em fragmentos rugosos (Waters, 1960).

As escoadas basálticas apresentam-se, no geral, escoriáceas na parte superior, não sendo rara a ocorrência de níveis de idêntica configuração no interior dos mantos, o que sugere sucessivos derrames de uma fase efusiva. São frequentes os aspectos de disjunção prismática, às vezes, de grande regularidade. Comuns também, são as disjunções em laje resultante da separação das escoadas basálticas por juntas paralelas às camadas. Mais frequentes ainda, são as disjunções esferoidais relacionados com fenómenos de meteorização da rocha basáltica, de que resultam corpos arredondados formados por capas concêntricas de rocha alterada, à semelhança de casca de cebola (Carvalho, et al., 1991).

Estas colunas são cobertas com uma área de pequenos prismas menos regulares, o que indica o arrefecimento muito rápido das partes superiores em relação às inferiores. Nos casos mais simples, as colunas formam-se perpendicularmente às isothermas, enquanto nos casos mais complexos, a direcção da coluna é condicionada pela orientação da superfície de tensão de tracção, não podendo ser paralela às linhas isotérmicas (Spry, 1962).

A análise das estruturas e intersecções das fracturas leva a um modelo de disjunção colunar, fomentando a ideia de que as juntas colunares crescem de forma incremental do exterior para o interior solidificando o magma (Cordua, 1999). Goehring e Morris (2008) sustentam que o raio e o tamanho da coluna são directamente proporcionais e inversamente proporcionais à taxa de arrefecimento da lava, respectivamente.

Como já foi sintetizado anteriormente, existem vários tipos de disjunções; prismática, em lajes e a esferoidal.

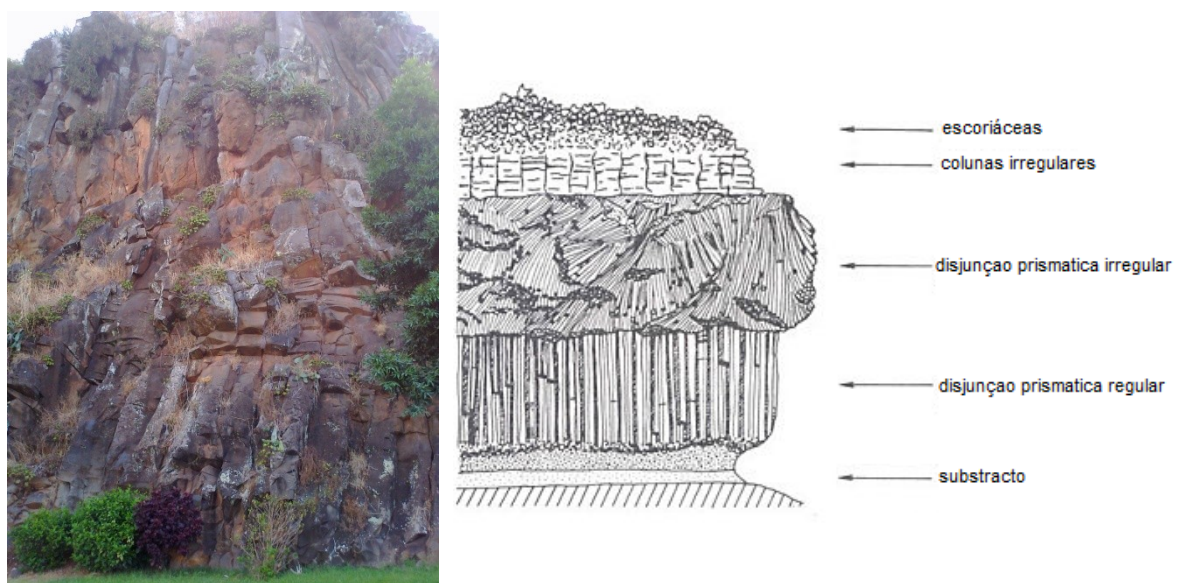


Figura 2.3: (A) Disjunção colunar irregular e em laje no talude da Achada e (B) corte completo de um maciço rochoso (Fonte: earth-of-fire.over-blog.com)

A disjunção prismática, ou colunar (Figura 2.3), origina-se quando praticamente já não existe fluxo e a lava está quase em repouso. As fendas de arrefecimento desenvolvem-se para dentro a partir das margens dividindo as rochas em colunas prismáticas. A diferença de temperatura entre o centro (mais quente) e o topo e base da escoada (já arrefecidas) permite a geração de células de convecção no seu interior.

Estas células são dispostas perpendicularmente à base da escoada e originam uma estrutura de retracção interna que individualiza prismas colunares, normalmente hexagonais ou pentagonais. Existe também polígonos de quatro, sete ou oito lados. O grau e a perfeição dependem da espessura e composição da lava e o quão rápido

arrefece. Se a lava apresentar-se homogénea, forma colunas perfeitas. De igual forma, se a lava apresentar-se heterogénea, forma colunas irregulares (Rodrigues, comunicação oral, 2011).

Como se sabe, estas formas geométricas são as que correspondem ao melhor arranjo espacial e as que apresentam a melhor relação perímetro/área em termos de ocupação de espaço. O papel da água na remoção do calor interior foi crucial na formação deste tipo de disjunção, assim como a taxa de arrefecimento determina a quantidade de disjunções colunares que se formam. Este modelo de formação através do arrefecimento serve para as colunas superiores como também para as inferiores (Goehring, et al., 2008).

Este fenómeno pode ser comparado a uma poça de lama. Com a evaporação da água, a lama encolhe através de fendas de contracção. A contracção torna a lama frágil provocando a quebra. As estruturas colunares dos basaltos resultam de processo equiparável, pela retracção nas superfícies expostas durante o arrefecimento.

Em certos lugares, ao arrefecer, o fluxo produziu uma orientação paralela dos cristais constituintes da lava, o que causa disjunções também paralelas, na direcção do fluxo (Grabham, 1948). Essas disjunções são chamadas de disjunção em laje (Figura 2.3). Essas disjunções são resultantes da separação das escoadas basálticas por juntas paralelas às “camadas”. Quando o fluxo de lava sofre variação de velocidade, como resultado de um aumento da taxa de efusão no centro emissor, também pode originar este tipo de disjunções. Geram-se, assim, planos de retracção paralelos à direcção de avanço do fluxo.

Durante o processo de arrefecimento, geram-se planos de retracção paralelos à direcção de avanço da escoada, ao longo dos quais, as bolhas de gás se concentram, originando vesículas de forma elíptica, cujo maior eixo está orientado segundo a direcção de fluxo. Esta disjunção é mais notória no centro da escoada (Canha, 2007).

Depois de começada a decomposição do basalto, as colunas e prismas são primeiramente divididos por fendas transversais e formam blocos que se vão por seu turno decompondo em camadas esferoidais concêntricas. Esta maneira de se desfazer em pedras esferoidais é típica do basalto e aparece em toda a Ilha da Madeira.

Ao contrário das disjunções colunares, as disjunções esferoidais, não são causadas directamente pelas acções do arrefecimento do fluxo de lava, mas sim, causadas pela meteorização sobre as faixas de crescimento das disjunções colunares. Com efeito, estas disjunções são criadas pelos efeitos das acções do vento e da chuva, ao longo dum período de tempo, por isso são susceptíveis de se encontrar nos maciços mais antigos (McClure, 1999). A disjunção esferoidal não é uma estrutura de retracção. Com efeito, trata-se de uma “descamação em bolas” que resulta de processos de meteorização, anteriormente referidos, que actuam sobre a rocha vulcânica.

Na origem deste fenómeno, está a presença de uma trama composta por descontinuidades planares (disjunções de retracção ou diáclases) preexistentes, que constituem zonas preferenciais de circulação de água e humidade, conseqüentemente, de alteração da rocha. Com os processos de meteorização, a actuarem ao longo desta trama, a rocha adquire uma forma aproximadamente esférica (em bolas), com a parte exterior mais alterada e um núcleo relativamente são.

2.4 ENQUADRAMENTO CLIMÁTICO

O clima da Ilha da Madeira é influenciado por factores gerais, relacionados com a circulação atmosférica e a sua localização, e por locais, como a exposição das vertentes, o relevo e a sua exposição.

No Arquipélago da Madeira, as condições meteorológicas predominantes, são determinadas pela intensidade e localização do Anticiclone Subtropical dos Açores. É nesta região que o anticiclone transporta na sua circulação, uma massa de ar tropical marítimo subsidente, principalmente na sua parte oriental, onde os fenómenos de subsidência são frequentes e intensos, e onde ocorrem os ventos de Nordeste, os denominados Alísios, na baixa troposfera. Estes predominam durante todo o ano numa zona do Atlântico, compreendida entre as latitudes 35° N e 20° N e a longitude limite W de 25° W (Abreu, 2008).

Relativamente às normais climatológicas constatou-se que a temperatura média anual do ar varia entre os 9 e os 19 °C, verificando-se os valores mais altos na vertente Sul. Em relação aos ventos predominantes, na Madeira, em média, são do rumo Norte e Noroeste, com frequências que não ultrapassam os 40 %. Quanto à

precipitação média anual, esta varia entre os 600 e os 2900 mm. A média ponderada, é de 1.628 mm (Instituto da Água, 2003).

Na Vertente Sul da Ilha da Madeira, abrigada dos ventos de norte e de noroeste, observa-se uma diminuição importante da precipitação, uma vez que as massas de ar húmidas, já aliviadas de parte do seu teor de humidade, devido às chuvas orográficas na Vertente Norte, têm tendência para a subsidência e conseqüente diminuição da sua capacidade higrométrica, com aumento da temperatura do ar e redução da precipitação (Weijden, et al., 2003).

A classificação dos climas faz-se com base em critérios convencionais, aplicados aos valores médios de elementos climáticos, da frequência da sua ocorrência, e da sua variação no ano. Segundo o Instituto da Água (2003) e de acordo com critérios simples de classificação, o clima da Madeira é:

- Quanto à temperatura: frio, nas áreas elevadas, e temperado, nas zonas de menor altitude (temperatura média anual do ar entre cerca de 13 °C e 19 °C) e o oceânico, relativamente à amplitude média da variação anual da temperatura do ar (inferior a 10 °C).
- Quanto a humidade do ar: seco (humidade relativa anual média do ar às 9 horas, inferior a 75 %), na zona do Funchal e Lugar de Baixo; nas restantes zonas é húmido.
- Quanto à precipitação: moderadamente chuvoso (precipitação anual média entre 500 mm e 1.000 mm) na maior parte da vertente Sul, próximo do mar e excessivamente chuvoso (precipitação superior a 1.000 mm), nas áreas mais elevadas (Abreu, 2008). Na vertente sul da Ilha, o nevoeiro não atinge valores significativos. Para além dos regimes médios anuais e mensais, salienta-se, a ocorrência de precipitações excepcionais, situações estas, que ocorrem com alguma frequência na região, têm efeitos catastróficos devido ao escoamento torrencial que originam.

2.5 ENQUADRAMENTO HIDROGRÁFICO

A elevada altitude média da ilha da Madeira, associada à relativa abundância de formações piroclásticas, declives acentuados e à elevada pluviosidade, conferem à água uma grande capacidade modeladora do relevo. Devido ao carácter torrencial

dos hidrometeoros, com torrentes muito vigorosas e activas nas estações pluviosas, a ilha apresenta-se com vales profundamente encaixados e uma grande capacidade de carga de material heterométrico, fruto da erosão perpetuada por aqueles agentes exógenos.

A maior parte das ribeiras madeirenses desenvolvem-se para Norte ou para Sul, ao longo do eixo topográfico da ilha, de orientação E-W, indo das zonas altas do interior para a periferia consoante a sua exposição. Pelo facto da costa Norte apresentar uma maior altitude, as linhas de água tem um trajecto mais declivoso, do que as suas homólogas que fluem para Sul. Os cursos de água na sua generalidade são estreitos, curtos, lineares e com uma orientação perpendicular à linha da costa.

Quase todas as principais ribeiras apresentam desníveis superiores a 1.200 m e extensões que raramente atingem os 20 km. A vertente Norte da ilha é sulcada por numerosas e pequenas ribeiras, as quais, mesmo no Verão, apresentam um caudal diminuto, contrariamente, às ribeiras da costa Sul que praticamente secam no período estival. A estrutura geológica da ilha, contribuí de forma determinante para a permanência do escoamento nalgumas ribeiras, (Rodrigues, 2005).

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente estudo e as considerações geotécnicas tomadas a este nível foram genericamente baseadas nas observações de campo, feitas pelos autores divulgados, no reconhecimento geológico de superfície, em elementos bibliográficos, nomeadamente a Carta Geológica da Madeira e respectiva notícia explicativa.

Se o vulcanismo adormecido há cerca de 6500 anos (Geldmacher, et al., 2000) não voltar a acordar, a meteorização e a erosão marinha cumprirão a sua missão fazendo recuar as arribas, rebaixar os relevos, alargar e aprofundar vales, tendendo-se para uma ilha aplanada e mais pequena, à semelhança da Ilha de Porto Santo, onde a actividade vulcânica parou há cerca de 8 Ma. No entanto, no decurso da história geológica das ilhas vulcânicas podem ocorrer hiatos prolongados na actividade vulcânica. Atendendo ao facto de, ainda existirem manifestações secundárias de vulcanismo, pode admitir-se que a Ilha da Madeira está, simplesmente, a atravessar um período de inactividade eruptiva, de certa forma semelhante aos verificados em tantas outras ilhas oceânicas (Prada, 2000).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Os ensaios para caracterização geomecânica dos maciços rochosos são importantes para a engenharia geotécnica e engenharia das rochas, sendo necessários para o completo conhecimento dos materiais em estudo, podendo ser utilizados ensaios de campo ou de laboratório para se obter alguns dos parâmetros requeridos, como recomendados pela ISRM (*International Society of Rock Mechanics*) (Filho, 2003).

Nos ensaios mecânicos de compressão sobre provetes de rocha a variável tempo (fluência), normalmente, não é considerada devido à evolução das deformações obtidas nos ensaios serem obtidas de forma relativamente rápida.

Um método típico de cálculo da resistência do maciço é através do número R do ressalto do martelo de Schmidt. Resistência é a força resultante da aplicação de uma força sobre um material, manifestando a sua resistência à deformação permanente. A resistência de um material rochoso depende de vários factores, como a composição mineral e a sua densidade. A resistência das rochas diminui com a humidade.

3.1.1 ENSAIO COM MARTELO DE SCHMIDT (CLÁSSICO TIPO N)

O martelo de Schmidt foi desenvolvido em 1948 por E. Schmidt, a fim de testar a dureza do betão. Mais tarde foi desenvolvido para os maciços rochosos.

É um aparelho que permite obter *in situ*, de uma forma simples e não destrutiva, a resistência à compressão simples de um maciço rochoso. A leitura dá directamente o valor da dureza da rocha. É um ensaio útil, de resistência superficial, sendo os valores obtidos meramente representativos, pois permitem avaliar a homogeneidade, o nível de resistência e decidir se é necessário ou não fazer ensaios mais complexos (Viles, et al., 2010).

Existe uma grande variedade de tipos de martelo. A mais utilizada e a que será usada nesta dissertação é a de tipo N. Este esclerómetro mede a distância do ressalto de um impacto numa superfície do maciço. Este martelo pode ainda fornecer dados de

uma grande variedade de tipos de rochas, desde tipos mais meteorizados aos mais resistentes. A resistência à compressão do esclerómetro varia entre 20-250 MPa.

Quando o martelo de Schmidt é pressionado contra uma superfície, o pistão é automaticamente libertado, provocando um ressalto. Parte da energia que o pistão de impacto liberta é consumido por absorção, ou seja, trabalho feito na deformação plástica da rocha sob a ponta do pistão e é transformada sob a forma de calor e som. A restante energia representa a resistência à penetração do impacto à dureza da superfície, o que faz com que o pistão possa recuperar a posição inicial. A distância percorrida pelo pistão após o impacto é chamada de ressalto (R). Este recuo é tanto maior quanto maior for a resistência à compressão da amostra.

O valor de R é mostrado por um ponteiro numa escala na lateral do instrumento (escala 1-10). Estes valores foram obtidos através de relações empíricas entre as leituras do ressalto e a resistência à compressão, determinado através de testes padrão (Barton, et al., 1990).

O ressalto do martelo R é influenciado pela força gravitacional, logo é de ter em consideração a inclinação formada entre o eixo longitudinal do esclerómetro e a superfície ensaiada. Os valores de R devem ser normalizados com referência à direcção horizontal.

Os resultados obtidos são influenciados também pelo tipo de martelo de Schmidt. A menos que o ângulo formado com a horizontal seja praticamente perpendicular à superfície testada, existe um risco de atrito de deslizamento na ponta do pistão, existindo uma transferência parcial da energia do martelo. Se a direcção do martelo não é vertical para baixo, deverá haver uma correcção necessária, de acordo com a Figura 4.1: Ábaco de Deere, *et al.*, (1966) para a determinação da resistência à compressão a partir da dureza do martelo de Schmidt.

A confiança nos resultados dos testes do martelo de Schmidt (valor R, adimensional) surge a partir de numerosos estudos de engenharia em que foi demonstrado uma boa correlação com diferentes parâmetros de rochas (Aydin e Basu, 2005).

Quanto ao número de impactos usados para obter o valor de R, Viles, *et al.*, (2010), propõe um novo *Suggested Method (SM) for the Schmidt Hammer* (ISRM, 1981) onde recomenda no mínimo 20 valores de impacto individuais de ressaltos. Viles, *et al.*, (2010), também sugere que nenhum dos valores baixos ou altos sejam descartados.

Outros estudos têm defendido métodos diferentes, onde por exemplo de 20 ressaltos, escolhe-se os 10 superiores, ou ainda em 50, descartar os 10 maiores e os 10 menores. Recentemente têm sido desenvolvidos estudos, para avaliar a dimensão da amostra necessária com o martelo de Schmidt, com base em métodos estatísticos (Niedzielski, et al., 2009).

O método estatístico desenvolvido por Niedzielski, Migon e Placek (2009), foi baseado no *Student's t-test*, para avaliar objectivamente o número mínimo de medidas de ressaltos. Os resultados foram apresentados conforme a média e a mediana, cada uma com um valor estimado único, e a distribuição da probabilidade empírica de tais estimativas com base em amostras *in situ*. Estes estudos, realizados em 36 amostras de basalto, obtiveram como resultados, para um nível de significância de 0,05, uma estimativa de amostra mínima:

- 33 ressaltos quanto à média e 29 em termos de mediana (é de ter em atenção que as rochas mais duras requerem maiores quantidades de amostra, sendo 30 um valor recomendado obtendo uma precisão superior).
- Para um nível de significância de 0,1, ambos estimaram 19.
- Estes estudos concluíram também que para interpretarmos os ensaios, os valores da mediana são mais reais que os da média, devido aos ensaios serem realizados por medições consecutivas.
- Se as superfícies expostas apresentarem meteorização, a quantidade de amostra mínima não deve ser inferior a 30 medições. Nas rochas meteorizadas não devem ser eliminados os valores baixos devido a estes valores serem causados pela meteorização.
- O tamanho da amostra deverá ser maior, conforme o grau de meteorização e a não homogeneidade do maciço.

A eliminação dos valores mais baixos produz efeitos diferentes e geralmente não é recomendado, a menos que o objectivo do estudo seja a obtenção de características de resistência das rochas, possivelmente não afectadas pelo desgaste.

Os resultados devem incluir uma descrição do tipo de rocha, localização, tamanho, forma e orientação do eixo do martelo.

Este método é usado em todo o mundo como um teste de índice de um equipamento de teste para estimar a resistência dos maciços à compressão devido à sua rapidez

na obtenção dos resultados; à sua simplicidade; portabilidade; ao preço acessível; à facilidade de execução; à possibilidade de alternar de operador e de permitir a obtenção de muitas leituras *in situ*, assim como ser um ensaio não destrutivo.

Como limitações, o esclerómetro de Schmidt é sensível às descontinuidades do maciço rochoso, portanto deve ser evitada a proximidade com fracturas. As rochas estratificadas não devem ser investigadas pelo martelo, pelo que, o basalto não apresenta qualquer inconveniente (Viles, et al., 2010).

O martelo de Schmidt de tipo N é menos sensível às irregularidades, sendo vantajoso em aplicações *in situ*, enquanto o martelo de tipo L tem maior sensibilidade nos resultados mais baixos e obtêm valores mais precisos quando as rochas são porosas (Aydin, 2008). O esclerómetro de tipo N ainda provoca uma menor dispersão nos dados, e um maior desempenho devido à maior energia no impacto mostrando-se mais eficiente que o martelo L, em prever a resistência à compressão uniaxial e módulo de Young (Aydin, et al., 2005; Demirdag, et al., 2009).

Através de Aydin (2008) concluiu-se que, o aumento da energia de impacto e do diâmetro da ponta do êmbolo reduz a dispersão dos valores numa rocha alterada e melhora a confiabilidade do martelo de Schmidt como ferramenta de caracterização do maciço rochoso. A forma e o diâmetro do êmbolo influenciam os valores do ressalto, apresentando uma resposta elástica nas rochas quando possui um diâmetro consideravelmente grande.

Os resultados podem ser influenciados pela rugosidade da superfície. As superfícies planas transmitem valores mais elevados do que superfícies ásperas ou irregulares. As irregularidades da superfície são frequentemente esmagadas antes da ponta do êmbolo atingir a superfície da rocha, resultando em alguma perda de energia de impacto. Tanto a magnitude como a repetibilidade e o espaçamento entre os actos aumentam o grau de polimento da superfície, influenciando os resultados obtidos (Demirdag, Yavuz e Altindag, 2009).

As propriedades mecânicas das rochas devem ser obtidas com precisão, por isso é necessária a limpeza das superfícies nomeadamente poeiras e possível vegetação. A massa de blocos de rocha a ser testada é significativa, logo os testes não podem ser realizados com pequenos blocos. Através de Viles, *et al.* (2010) a massa mínima para um bloco a ensaiar é de 25 kg e uma espessura mínima de 11 cm.

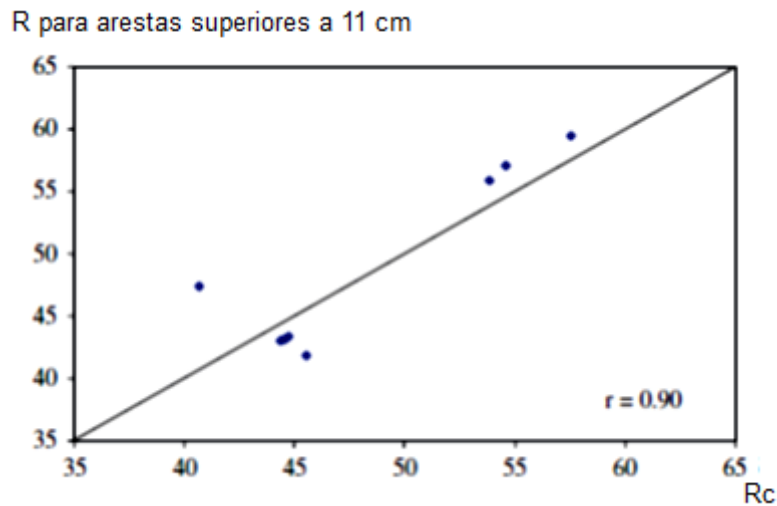


Figura 3.1: Relação entre o valor estimado (Rc) e R para o tamanho da amostra superior a 11 cm (Demirdag, et al., 2009) .

Através da Figura 3.1 coeficiente de correlação de $r = 0,90$ indica uma relação significativa entre Rc e R medido com uma aresta superior a 11 cm.

O valor de R é obtido através de superfícies com mais de 10 cm de espessura. A direcção de impacto e as características a que foi obtido devem ser registadas de modo a correlacionar com iguais características de E_y (modulo de Young, elasticidade) e UCS (resistência à compressão simples) (Aydin, 2008).

O teor de humidade da rocha na zona de influência do impacto é um factor importante, podendo afectar o valor do ressalto (R) do esclerómetro porque a humidade permite o amolecimento das ligações das partículas do basalto (Aydin, 2008). A influência da humidade na rocha varia de acordo com a porosidade e permeabilidade da rocha, factores que se reflectem na absorção da humidade. Outros factores como a espessura da amostra, a sua meteorização e a angularidade da rocha e também a inclinação do cume influenciam o teor de humidade e consequentemente o valor do ressalto (Sumner, et al., 2002). À medida que a humidade aumenta, a dureza das rochas diminui (Demirdag, et al., 2009).

Através de Aydin e Basu (2005), foi possível relacionar o grau de meteorização da rocha (Tabela 3.1) e o valor do ressalto do martelo de Schmidt. Os resultados obtidos permitiram concluir que num determinado ponto, o grau de meteorização obteve melhores resultados quando é adquirido através de vários impactos.

A magnitude dos valores do ressalto dos primeiros dois impactos, em função do grau de meteorização, permite obter uma indicação do grau de meteorização (Figura 3.2). Para diferentes condições de humidade, este efeito pode ser significativo na interpretação do estado de meteorização, a partir dos valores do ressalto do martelo de Schmidt (Sumner, et al., 2002).

Tabela 3.1: Classificação da alteração do maciço rochoso de acordo Geological Society (London) Engineering Group Working Party 1977. (Aggitalis, et al., 1996)

Grau de meteorização	Expressão	Descrição
I	<i>Fresh</i>	Não aparecem sinais de meteorização
II	Ligeiramente meteorizada	Todo o conjunto rochoso encontra-se descolorado por meteorização
III	Moderadamente meteorizado	Menos de metade do maciço rochoso encontra-se decomposto ou transformado em solo. A estrutura <i>fresh</i> aparece de forma contínua ou como núcleos isolados
IV	Altamente meteorizado	Mais de metade do maciço aparece decomposto ou transformado em solo. A estrutura <i>fresh</i> aparece como núcleos isolados
V	Completamente meteorizado	Todo o maciço aparece decomposto ou transformado em solo. A estrutura original do maciço encontra-se intacta
VI	Solo residual	Todo o maciço transformou-se em solo. A estrutura do maciço encontra-se destruída

O tamanho dos grãos é importante nos resultados obtidos pelo martelo de Schmidt. Quanto menor o tamanho dos grãos, menor a dispersão dos resultados. Isto implica que com um aumento de energia de impacto e o diâmetro do êmbolo, permite reduzir ainda mais a dispersão dos valores do ressalto e melhorar a confiabilidade do martelo de Schmidt quando aplicado na caracterização do maciço rochoso, nomeadamente o martelo de tipo N (Aydin, et al., 2005).

Devido à dificuldade de determinar a presença de fendas e outras descontinuidades directamente pelos pontos de impacto nas superfícies, deve ser evitada a verificação sobre superfícies expostas, laminadas ou rochas fracturadas.

A fim de preservar as camadas soltas das paredes finas, a superfície não deve ser polida. Isto provocará asperezas pequenas que poderão causar uma redução

significativa nos valores do ressalto R. Como resultado tais paredes devem ser levemente polidas para evitar variações nos resultados reais. É no entanto mais simples reunir dois conjuntos de dados antes e após o polimento das superfícies de descontinuidade, o que permitirá o cálculo dos valores da resistência ao corte (Aydin, 2008).

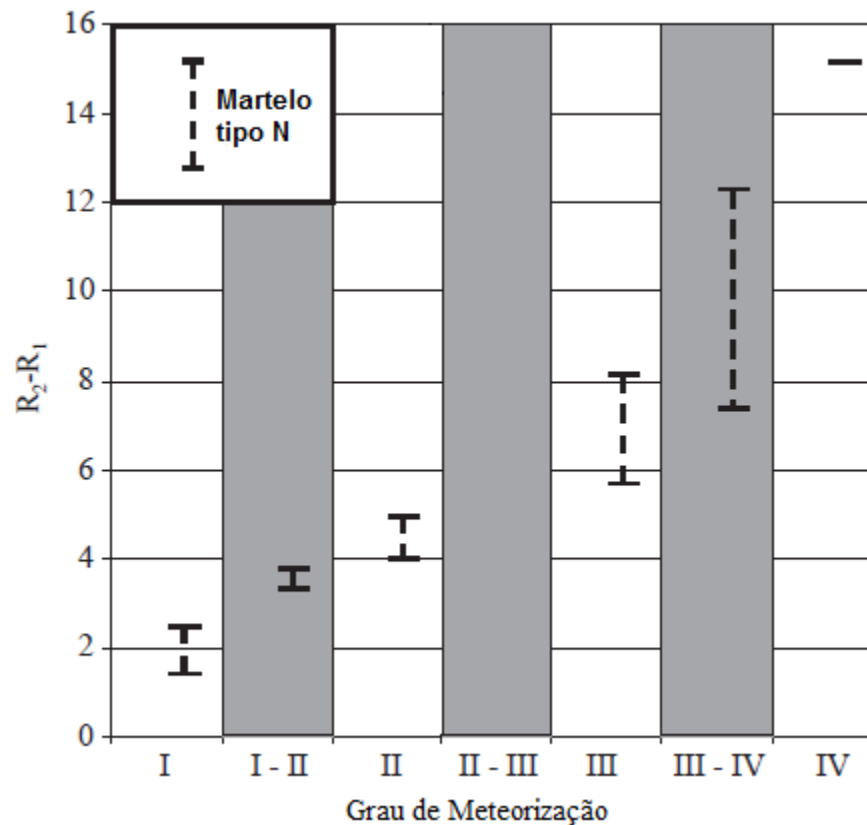


Figura 3.2: Variação do valor do ressalto durante os dois primeiros impactos de acordo com o grau de meteorização da superfície de impacto (Aydin, et al., 2005).

Como os valores de UCS (resistência à compressão uniaxial), e E_y (modulo Young) são influenciados pela densidade, conectividade e distribuição dos seus elementos, os valores de R são também necessários para reflectir a natureza da heterogeneidade e propriedades mecânicas. As variações na dureza superficial devem ser representadas através da média, da mediana ou modo.

De igual forma, o intervalo de leitura de ser registado também. O valor de pico do ressalto do esclerómetro, obtido através de impactos repetidos num ponto representa um estado alterado de superfície do material da rocha, levando à previsão errada da UCS e E_y (Aydin, 2008). Assim a zona de teste deve ser

fotografada, permitindo uma melhor apreciação para análise estatística e evitando a descrição detalhada das características (Aydin, 2008).

Outros estudos indicam uma forte relação empírica entre o valor do ressalto, R , do martelo de Schmidt e o módulo de elasticidade, E_y (Young), a resistência à compressão uniaxial e a densidade. Através do número obtido pelo martelo de Schmidt, relacionando com a resistência à compressão simples, pode-se dizer que é impossível obter uma só relação comum para todos os tipos de rochas, apesar de embora as condições experimentais e os tipos sejam os mesmos.

Através dum estudo do ressalto do esclerómetro com sete rochas diferentes, foi relacionado o módulo de elasticidade (Young), com a compressão uniaxial e a densidade (Katz, et al., 1999). Estes estudos concluíram que:

- As rochas têm um comportamento elástico;
- As rochas que se desintegram sob o impacto do martelo não apresentam resultados aceitáveis;
- As medições devem ser realizadas em superfícies lisas;
- Os resultados podem ser obtidos através de blocos com peso específico mínimo. Além disso o valor do ressalto do esclerómetro pode ser relacionado com os valores de *Rock Quality Designation* (RQD).

Estes valores têm a condicionante de serem influenciados pela repetibilidade das medições, aumentando o valor do ressalto com a intensidade do polimento, expondo assim a camada de rocha intacta. Outra condicionante é a proximidade com as fracturas que podem reduzir as leituras do valor do esclerómetro (R), devido ao ressalto que provoca. A medição de um bloco fracturado fornece um valor confiável de R se o bloco apresentar tamanho mínimo adequado. A boa relação com o módulo de elasticidade deve-se ao facto das rochas serem duras e terem boas propriedades elásticas.

Além da resistência à compressão e o módulo de elasticidade, Young, foram feitas tentativas para determinar a correlação entre os valores de R e outras medidas de propriedades físicas da rocha (Viles, et al., 2010). Estes resultados foram obtidos através de testes simples realizados em campo (Aggitalis, et al., 1996), onde se obteve coeficientes de correlação relativamente elevados, todos superiores que 95%. Estas relações permitem estimar tanto a resistência à compressão como o

módulo de Young, a partir do número de ressalto do martelo de Schmidt usando simples relações matemáticas (Yilmaz, et al., 2002).

A análise de regressão múltipla demonstrou ser uma ferramenta importante, que pode ser usada para descrever as relações entre as propriedades da rocha. Através destas relações, Aggitalis, *et al.* (1996), obteve a seguinte equação com uma correlação de $r=0,86$. Equação 3.1:

$$UCS = 1,18 R - 22,37 Weath + 25,9 \quad \text{Equação 3.1}$$

em que:

- UCS - resistência à compressão uniaxial
- R - valor do ressalto do martelo de Schmidt no basalto
- Weath - grau de meteorização do basalto

Outras equações foram obtidas para uma rápida avaliação entre resistência à compressão uniaxial, e o número de ressalto (R) do martelo de Schmidt (Figura 3.3):

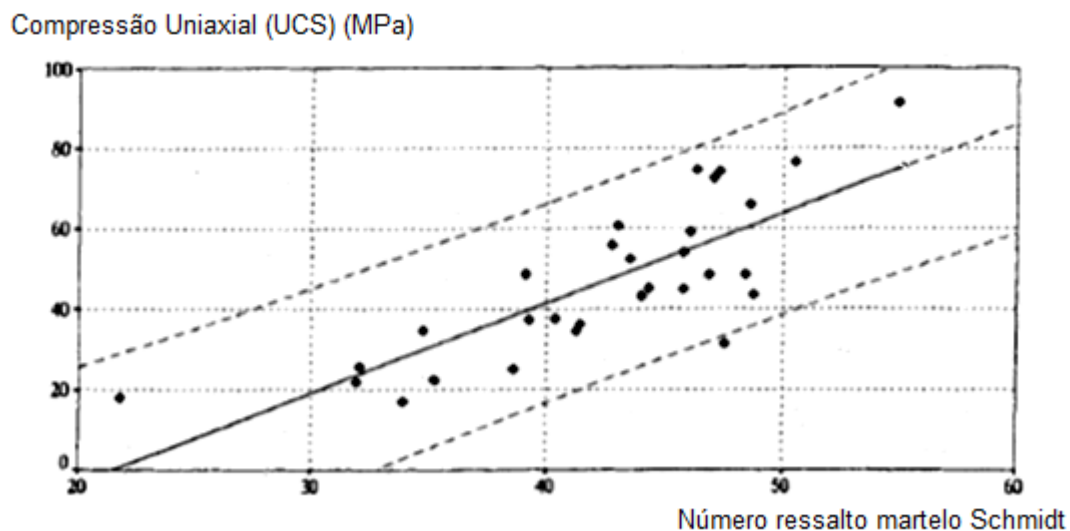


Figura 3.3: Relação entre compressão uniaxial e número de ressalto do martelo de Schmidt (N) (Aggitalis, et al., 1996)

3.1.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO SIMPLES OU UNIAXIAL

Apesar das rochas que constituem um maciço estarem geralmente submetidas a estados de tensão triaxiais, tem interesse o estudo do comportamento das rochas quando estas são submetidas a compressão simples, uniaxial, pois, este estudo

permite por em evidência, características importantes na mecânica dos maciços rochosos.

Este tipo de ensaio de compressão é frequentemente usado na determinação das características mecânicas das rochas. A resistência à compressão uniaxial é obtida através dum provete de rocha de forma cilíndrica, submetido a uma tensão normal, σ , na base, igual à razão da força normal W_r , pela área da base A . Estes provetes são normalmente recolhidos de tarolos provenientes de sondagens. A preparação da amostragem deve ser feita com cuidado, de modo a rectificar a superfície das bases que irão sofrer compressão para garantir uma forma cilíndrica perfeita.

Resistência à compressão é a capacidade de um material resistir a forças de compressão axial direccionada. A resistência à compressão uniaxial (UCS) é obtida por ensaio, definido pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e realizado de acordo com a recomendação da *International Society of Rock Mechanics* (ISRM). É um ensaio muito utilizado na mecânica das rochas na determinação da sua resistência e deformabilidade de uma rocha intacta. No entanto, estes ensaios exigem uma cuidadosa preparação das amostras, assim como os testes são caros. Normalmente, a força de compressão da rocha é definida pela tensão máxima.

Os ensaios realizados em laboratório seriam impraticáveis devido às despesas de custos e trabalho, até por razões de sustentação não é aconselhável colher amostras. No entanto, os ensaios realizados em laboratório, geralmente, não reflectem na realidade as propriedades do maciço, comparando com os testes *in situ*. Os testes em laboratório não têm em consideração as juntas, a heterogeneidade do maciço, e outros factores como os planos de falha. Portanto os valores admitidos em laboratório têm que ser aplicados em engenharia conforme os regulamentos.

Como vantagens, o ensaio de compressão uniaxial, é mais conhecido e os resultados estão disponíveis para uma ampla variedade de tipos de rochas, com experiência na articulação destes resultados para o campo a desenvolver (Bieniawski, 1974).

O ensaio de compressão uniaxial é de execução simples porém, a preparação da amostra cilíndrica deve ser com cuidado e deverá efectuar-se um número relativamente grande que permite garantir a representatividade dos resultados (Filho, 2003). O seu valor representa a tensão necessária para provocar a ruptura da

rocha, quando submetida a esforços compressivos. É determinada pela relação da Equação 3.2 (Ribeiro, 2010).

O comportamento da rocha é normalmente não reversível, o que significa que a deformação sofrida pela amostra nunca poderá ser recuperada na totalidade se houver uma descarga. A diminuição da compressibilidade da amostra deve-se ao facto das fissuras presentes em qualquer rocha fecharem no início da compressão. Após isto, a rocha tem um comportamento aproximadamente elástico.

$$UCS = \frac{W_r}{A} \quad \text{Equação 3.2}$$

em que:

- UCS – resistência à compressão uniaxial (Pa)
- W_r – força de ruptura (N)
- A – área de carga (m²)

O material rochoso geralmente tem uma baixa resistência à tracção. Esta baixa resistência à tracção é devido à existência de fissuras na rocha. A existência de microfissuras pode ser a causa das quedas de blocos subitamente pela tensão provocada por uma pequena deformação (Zhao, s. d.).

A resistência à compressão simples das rochas pode ser correlacionada com a sua dureza. A dureza nas rochas é um conceito diferente daquele que é considerado nos minerais. Geralmente é associada com a chamada dureza de Schmidt que é determinada através do ensaio com o martelo de Schmidt. Este valor é depois correlacionado com a resistência à compressão simples da rocha constituinte da superfície ensaiada, de acordo com o valor do seu peso volúmico.

Vários investigadores têm estudado a relação entre a resistência à compressão da rocha e o valor do ressalto (R) do martelo de Schmidt (Yagiz, 2008). Estes estudos foram comparados com estudos anteriores e concluiu-se que mesmo com condições experimentais e tipos de testes iguais, não foi possível obter relação aplicável a todos os tipos de rochas. Estes estudos sugerem ainda que são importantes as equações propostas, para estimar as características da rocha, através do ressalto do martelo de Schmidt (R) na fase preliminar. Embora, em comparação com pesquisas anteriores, indica que estes devem ser usados com cautela dependente de cada tipo

de rocha, daí que os relacionamentos obtidos das correlações devem ser usados em basaltos com graus de meteorização semelhantes aos utilizados nos estudos.

A correlação obtida para o valor do ressalto do esclerómetro e o ensaio de compressão simples ou uniaxial foi de $R=0,97$ para o basalto, sendo um coeficiente de correlação elevado. A relação entre R e UCS é definido pela Equação 3.3 (Dinçer, et al., 2004):

$$UCS = 2,75R - 36,83 \qquad \text{Equação 3.3}$$

em que:

- UCS - resistência à compressão uniaxial
- R - valor do ressalto do martelo de Schmidt no basalto

Esta técnica é baseada na combinação de índices de resistência à compressão, das características das discontinuidades (comprimento, intensidade, orientação, material de preenchimento), e das características da meteorização, entre outros, a fim de obter uma classificação numérica. Através da experiência obtida, o sistema pode ser calibrado para reflectir com maior precisão a resistência do maciço rochoso (Zostrich Geotechnical).

A relação entre UCS determinado em laboratório e o valor de UCS obtido através do martelo de Schmidt, obtido com amostras de basalto compactado da Ilha da Madeira, foi de 0,7 (Perneta, 2010).

3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estes ensaios confirmam que a experiência prática é ainda hoje reconhecida como a base mais confiável, para a concepção de obras que envolvem maciços rochosos. Isto está de acordo que a função do engenheiro não é calcular com precisão, mas sim julgar profundamente. Assim a boa experiência prática e a sensação correcta do problema é essencial.

A visão deve ser apoiada, porque embora os métodos teóricos são necessários para proporcionar um maior entendimento do assunto, uma assistência prática e com sentido para o engenheiro de projecto deve ser incentivado, mesmo que implique o sacrifício e rapidez de aplicação.

4 METODOLOGIA DE TRABALHO

4.1 CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS

O maciço rochoso como meio descontínuo apresenta um comportamento geomecânico que pode ser estudado em função das suas aplicações, mediante a observação directa e a realização de simples ensaios, através dos índices de qualidade. Estes índices relacionados com os parâmetros geomecânicos do maciço, obtêm as classificações geomecânicas para a estabilização de taludes. O comportamento do maciço rochoso está sujeito às condições de tensão *in situ* e à presença de águas subterrâneas. A qualidade do maciço rochoso pode, então ser quantificada (Vallejo, 2002).

A investigação geotécnica em maciços rochosos é feita com a realização de ensaios, em particular *in situ*, tendo em consideração a natureza descontínua, heterogénea e anisotrópica desses maciços, pelo que a avaliação dos parâmetros geomecânicos é, em larga medida, influenciada pelos volumes ensaiados.

Nos maciços verifica-se, por vezes, a existência de estruturas geológicas mais alteradas ou de maior rigidez, que coexistem com matrizes homogéneas de solo ou de rocha, o que confere aos maciços uma acentuada heterogeneidade. A implicação desta heterogeneidade na investigação e na classificação dos maciços é extremamente importante e com reflexos evidentes na obtenção dos parâmetros das formações envolvidas (Miranda, et al., 2005).

Os ensaios *in situ*, visando a determinação das características de deformabilidade dos maciços, são normalmente conduzidos aplicando uma carga de uma determinada forma e medindo-se as correspondentes deformações do maciço. Os parâmetros de deformabilidade dos maciços podem também ser determinados através de correlações, com os vários sistemas de classificação de maciços existentes, tais como a geometria das discontinuidades e rigidez (Harrison, et al., 2005).

Em geral, as classificações baseiam-se na combinação de alguns dos seguintes parâmetros (Ferrer, et al., 1999).

- Resistência do material rochoso
- RQD
- Espaçamento das descontinuidades
- Orientação das descontinuidades
- Condições das descontinuidades (continuidade, espaçamento, rugosidade, meteorização e relevo)
- Estrutura geológica e fracturas
- Filtrações
- Estado tensional

Os sistemas de classificações geomecânicas vêm-se desenvolvendo há mais de 100 anos, desde Ritter em 1879, onde tentou abordar de forma empírica, a projecção de um túnel, de modo a determinar os seus apoios.

A maioria das classificações geomecânicas foi desenvolvida a partir de casos de relatos de engenharia civil, a partir do qual todos os componentes geomecânicos do maciço rochoso foram incluídos. São recomendáveis pelo menos dois métodos de classificação porque diferentes sistemas de classificação podem apresentar diferentes perspectivas nos diversos parâmetros (Hoek, Kaiser e Bawden, 2000). As propriedades mais complexas dos maciços, em particular a sua anisotropia e o seu comportamento ao longo do tempo, não podem ser suficientemente descritos por um só valor.

Todos os factores e a sua interacção devem ser considerados, dado que a determinação das propriedades do maciço rochoso não é suficiente. Um método de identificar um factor que inter-relaciona com outro é através de uma matriz de interacções. Nos sistemas de classificação representados matricialmente considera-se que cada parâmetro é composto de duas partes: o peso do parâmetro e a avaliação do maciço rochoso.

Estas classificações atribuem pesos aos parâmetros relativos às características do maciço, sendo posteriormente obtido um índice geomecânico que resulta de aplicação de expressões de cálculo associados ao sistema empírico utilizado. Permitem, normalmente, dividir o maciço em determinadas classes de

comportamento a que estão associadas, nomeadamente, soluções construtivas e suportes, bem como certos parâmetros geomecânicos.

A classificação geomecânica serve para classificar os maciços através de um conjunto de propriedades identificadas por observação directa, ensaios realizados *in situ* e ensaios laboratoriais em amostras recolhidas em sondagens. O objectivo é sistematizar o conjunto de elementos geotécnicos que interessa caracterizar num determinado maciço. Nos maciços rochosos a caracterização é feita, fundamentalmente, através da realização de ensaios e na utilização de metodologias empíricas, como o sistema RMR de Bieniawski (1989).

4.1.1 CLASSIFICAÇÃO DE BIENIAWSKI OU SISTEMA RMR (ROCK MASS RATING)

Bieniawski (1974) introduziu e desenvolveu um sistema de classificação geomecânica, Rock Mass Rating (RMR), num determinado maciço rochoso e pressupõe o seu zonamento. A definição das zonas é efectuada tendo em atenção as características litológicas, estruturais ou o grau de alteração das formações rochosas. O sistema RMR é usado para a finalidade para a qual ele foi desenvolvido e não como a resposta para todos os problemas (Bieniawski, 1989).

A classificação originalmente incorporava oito parâmetros geológico-geotécnicos, sendo posteriormente constituída por seis, que influenciam de modo determinante o comportamento dos maciços rochosos. A classificação RMR é tratada como uma quantidade escalar, mas na verdade é determinado por variáveis de vários vectores.

Esta classificação tem em conta os seguintes parâmetros geomecânicos:

- Resistência à compressão uniaxial do material rochoso intacto;
- Grau de fracturação do maciço através de RQD (*“Rock Quality Designation”*);
- Espaçamento das descontinuidades;
- Condições das descontinuidades;
- Condições hidrogeológicas (estimada nas piores condições possíveis);
- Orientação das descontinuidades em relação à orientação da escavação.

Cada um dos parâmetros é classificado em termos de valores ponderais, procede-se ao somatório desses valores no sentido de definir um índice que é designado como RMR e que apresenta uma variação entre 0 e 100 (Alberto, 2010).

De modo a aplicar a classificação geomecânica RMR, divide-se o maciço em secções que apresentam características geológicas uniformes, e cada região é classificada separadamente, de acordo com dados de campo para a aplicação das classificações geomecânicas (Bieniawski, 1989).

Tabela 4.1: Classificações geomecânica RMR (adaptação de Bieniawski (1989))

Parâmetros de classificação									
1	Resistência do material rochoso intacto	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	<1
		Valores ponderais	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)	Valores ponderais	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25		
			20	17	13	8	3		
3	Descontinuidades (m)	Valores ponderais	>2	0,6 - 2	0,2 - 0,6	0,06 - 0,2	<0,06		
			20	15	10	8	5		
4	Condições das descontinuidades	Comprimento descontinuidade (m)	<1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	>20		
		Valores ponderais	6	4	2	1	0		
		Abertura (mm)	Nenhuma	<0,1	0,1 - 1	1 - 5	>5		
		Valores ponderais	6	5	4	1	0		
		Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Ligeiramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Valores ponderais	6	5	3	1	0		
		Preenchimento (mm)	Nenhuma	Duro <5	Duro > 5	Mole <5	Mole > 5		
		Valores ponderais	6	4	2	2	0		
		Meteorização	Inalterada	Ligeiramente alterada	Moderadamente alterada	Muito alterada	Decompоста		
		Valores ponderais	6	5	3	1	0		
5	Presença de água	Condições gerais do maciço	Seco	Ligeiramente e húmido	Húmido	Escorridos	Fluxo abundante		
		Valores ponderais	15	10	7	4	0		

Apesar dos maciços rochosos serem descontínuos na natureza, podem contudo ser uniformes em algumas regiões, quando, por exemplo, o tipo de rocha ou os espaçamentos das descontinuidades são os mesmos em toda a região. Na maioria dos casos, os limites das regiões estruturais coincidem com as principais características geológicas, nomeadamente zonas de deformação, fracturas e por aí adiante (Bieniawski, 1989). A obtenção do índice RMR apresenta-se na Tabela 4.1

Uma vez obtidos os resultados dos cinco parâmetros de classificação RMR, efectua-se uma correcção da orientação das descontinuidades e obtém-se um valor numérico. As orientações das descontinuidades para encostas condicionam o comportamento dos maciços rochosos, representado na Tabela 4.2. Um erro neste valor pode prejudicar qualquer avaliação cuidadosa da massa rochosa, o trabalho de classificação torna-se difícil e arbitrário. Romana (1993) propôs um novo método de classificação baseado no conceito RMR, desenvolvido para os taludes. Bieniawski (1989) aprovou este método.

Tabela 4.2: Correcção relacionada com a orientação das descontinuidades (adaptado de Bieniawski (1989)).

Direcção das descontinuidades perpendicular ao eixo do túnel				Direcção das descontinuidades paralela ao eixo do túnel		Qualquer
Avanço do túnel no sentido do pendor		Avanço do túnel no sentido inverso ao pendor		Inclinação		Inclinação
45-90°	20-45°	45-90°	20-45°	45-90°	20-45°	0-20°
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	Razoável	Razoável
Orientação das descontinuidades		Muito favoráveis	Favoráveis	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Valor ponderativo para ajuste de RMR	Tuneis	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

A aplicação desta correcção não é fácil já que uma determinada orientação pode ser favorável ou desfavorável, dependendo das condições das águas subterrâneas e das próprias descontinuidades. O espaçamento das descontinuidades é a distância

medida ao longo de uma linha perpendicular aos planos de descontinuidade. Deve ser representado pelo espaçamento médio.

O significado geotécnico expressa-se na Tabela 4.3. Os resultados obtidos classificam o maciço em cinco tipos, desde o muito bom (classe 1) ao muito fraco (classe 5), a que lhe são atribuídos uma qualidade e características geotécnicas, bem como define-se os valores da coesão e do ângulo de atrito interno dos maciços rochosos.

Assim um maciço rochoso classificado como muito bom, (classe 1) será um maciço rochoso duro, pouco fracturado, sem filtrações importantes e pouco meteorizado, apresentando poucos problemas em relação à estabilidade e resistência do maciço. Este tipo de maciço não precisa praticamente de medidas de estabilização e reforço para melhorar o seu comportamento, possuindo uma capacidade de carga alta, permite a escavação de taludes com encostas bastante inclinadas.

Tabela 4.3: Classificação dos maciços rochosos de acordo com o RMR (adaptado de Bieniawski, (1989))

Somatório dos pesos (factor RMR)	81-100	61-80	41-60	21-40	<20
Classes	I	II	III	IV	V
Qualidade do maciço	Muito bom	Bom	Razoável	Fraco	Muito fraco
Coesão da massa rochosa (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Angulo de atrito da massa rochosa	>45	35<45	25<35	15<25	<15

Segundo Romana, Serón e Montalar (2003), foram classificadas várias encostas, onde obtiveram resultados com uma certa tendência estatística.

- Quando $RMR > 40$, a estabilidade do talude é regida tanto pela orientação e resistência das descontinuidades;
- Para $RMR < 30$, a fractura desenvolve em todo o maciço rochoso.

Através de Zenóbio e Zuquette (2006), concluiu-se que o sistema RMR é um pouco limitado para a avaliação do maciço rochoso, obtendo valores conservadores, dado que o grau de meteorização não é tido em conta directamente no sistema e também não considera a orientação das descontinuidades em relação em estudo. Embora o sistema RMR tenha sofrido algumas alterações, não foram incluídas alterações às orientações das descontinuidades na encosta do maciço rochoso.

No entanto, outros parâmetros são necessários avaliar em detalhe para a classificação do maciço rochoso a fim de obter resultados que são compatíveis com a

sua classificação. No que respeita a recolha de dados para o índice de número de descontinuidades por unidade de volume (J_v), é importante que todas as descontinuidades desse maciço rochoso sejam analisadas em detalhe e identificadas, não só fracturas mas todos os que apresentem comportamento semelhante a uma descontinuidade. Isto porque em alguns casos as estruturas planares comportam-se como descontinuidades e quando são identificadas podem induzir a erro de recolha de dados para o índice J_v , e conseqüentemente na avaliação do maciço rochoso (Zenóbio, et al., 2006).

4.1.1.1 Resistência do Material Rochoso

Um dos grandes problemas na geotecnia é estimar a resistência do maciço rochoso. As propriedades de resistência e deformação de um maciço rochoso são muito condicionados pela existência de descontinuidades, ou seja, as propriedades mecânicas estão relacionadas com a qualidade do maciço rochoso. Em geral, um maciço rochoso de boa qualidade, terá uma maior resistência, que um maciço rochoso pobre (Zhao, s. d.).

Os blocos podem apresentar diferentes níveis de meteorização. Além disso, as superfícies de contacto podem variar de limpo a coberto por vegetação. A determinação de testes *in situ* por meio de testes de laboratório, geralmente, não é prático, por isso essa força deve ser estimada a partir de observações geológicas e de resultados de testes em blocos de rocha individuais (Hoek, et al., 2000).

A resistência do material rochoso na classificação RMR é determinada pelos valores da resistência à compressão uniaxial e pode recorrer-se aos valores da dureza de Schmidt (R) que são obtidos através da utilização do martelo de Schmidt, (tipo N) *in situ*, sendo um teste fácil, rápido, barato e confiável (Yagiz, 2008).

Na determinação das propriedades da rocha, Tabela 4.4, é essencial a assistência prática para determinar a resistência dos materiais rochosos (Bieniawski, 1974). O grau de consistência, resistência e índices físicos é estimado com base na apreciação táctil-visual das características de resistência ao impacto, trabalhabilidade do material e estimativa da resistência à compressão simples, através de ensaios de martelo de Schmidt realizados em amostras típicas.

A dureza de Schmidt (R) é obtida através do ensaio com o martelo de Schmidt. O valor obtido é posteriormente relacionado com a resistência à compressão simples

da rocha constituinte da superfície ensaiada, de acordo com o valor do seu peso volúmico, Figura 4.1.

Tabela 4.4: Classificação proposta pela ISRM, que em função do grau de qualidade da rocha, correlaciona a resistência à compressão simples (σ_c) com o comportamento do material face àquelas análises expeditas. (Lima, et al., 2008)

Grau	Designação	Resistência à compressão simples (MPa)	Análise expedita
R6	Extremamente elevada	>250	A rocha lasca depois de sucessivos golpes de martelo e ressoa quando batida
R5	Muito elevada	100 - 250	Requer muitos golpes de martelo para partir espécimes intactos de rocha
R4	Elevada	50 - 100	Pedaços pequenos de rocha seguros com a mão são partidos com um único golpe de martelo
R3	Mediana	25 - 50	Um golpe firme com o pico do martelo de geólogo faz identificações até 5 mm, com a faca consegue-se raspar a superfície
R2	Baixa	5 - 25	Com a faca é possível cortar o material, mas este é demasiado duro para lhe dar a forma de provete para ensaio triaxial
R1	Muito baixa	1 - 5	O material desagrega-se com golpe firme do pico do martelo de geólogo
R0	Extremamente baixa	0,25 - 1	Penetrada pela ponta do dedo polegar; moldada pelas mãos; facilmente penetrada pelo canivete e martelo de geólogo;

A resistência à compressão simples das rochas afim de tratamento de dados pode ser correlacionada com a sua dureza, **Equação 3.3**.

De acordo com o ISRM, o número de ensaios abordados para os ensaios são 10, obtendo-se a média desses valores. O valor médio de R é posteriormente relacionado com o peso específico do material rochoso na Figura 4.1: Ábaco de Deere, et al., (1966) para a determinação da resistência à compressão, de modo a encontrar o valor da resistência à compressão uniaxial, em MPa, este último permite a definição do respectivo peso na classificação geomecânica de Bieniawski (1989).

Nas rochas meteorizadas não devem ser eliminados os valores baixos, devido a estes valores serem causados pela meteorização.

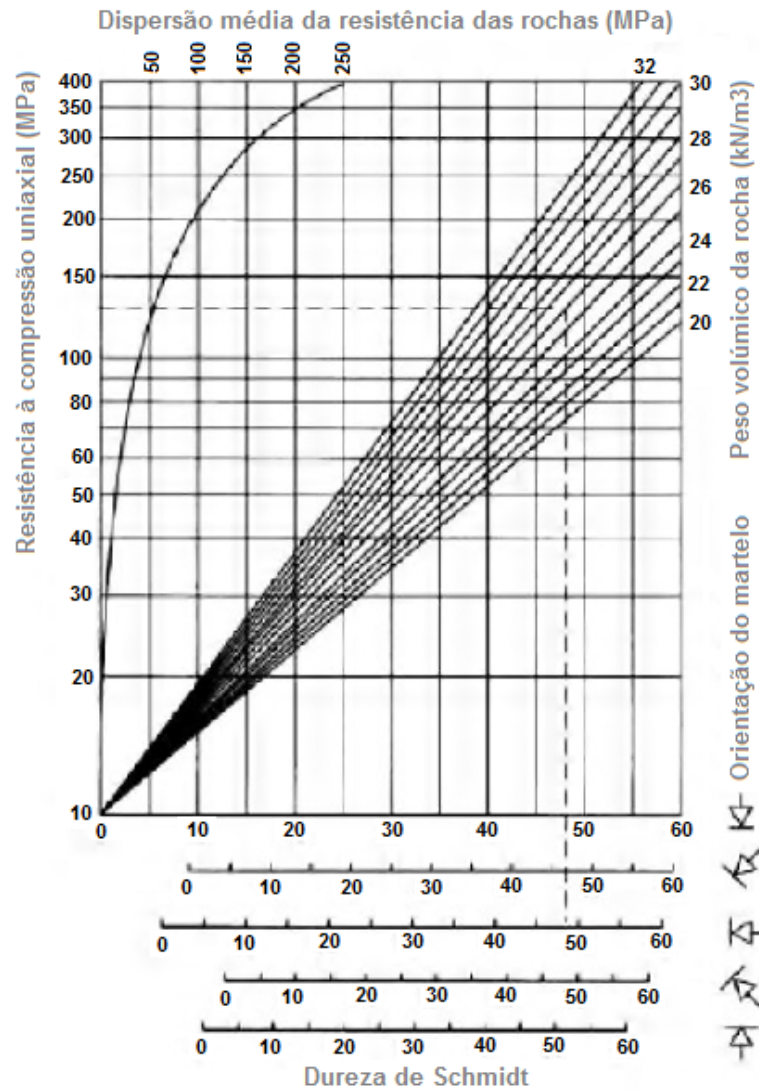


Figura 4.1: Ábaco de Deere, *et al.*, (1966) para a determinação da resistência à compressão

4.1.1.2 Rock Quality Designation (RQD)

O índice RQD (*Rock Quality Designation*) foi desenvolvido por Deere e Miller (1966), a fim de fornecer uma estimativa quantitativa da qualidade dos maciços rochosos, pretende representar a qualidade do maciço rochoso *in situ*. É utilizado como componente de RMR.

RQD representa o grau de fracturamento do maciço rochoso, inclui desde solos fragmentados a rochas em muito bom estado, excluindo os que apresentam um grau de meteorização avançado (a partir do grau IV), considerando um valor de RQD = 0 % (Ferrer, *et al.*, 1999). Não são consideradas fracturas artificiais, produzidas por explosivos.

Segundo os resultados obtidos para o valor de RQD, a qualidade do maciço descreve-se através da Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Classificação da qualidade do maciço rochoso de acordo com os valores do RQD (Deere, et al., 1966).

RQD (%)	Qualidade do maciço Rochoso
0-25	Muito fraco
25-50	Fraco
50-75	Razoável
75-90	Bom
90-100	Excelente

Para o estudo dos maciços rochosos, por vezes, não é possível a realização de sondagens e a consequente obtenção de amostras, nestas condições podem definir-se os valores de RQD, para maciços rochosos, a partir do índice de diaclasamento volumétrico (J_v) que corresponde ao número total de fracturas por metro cúbico. Para um conjunto de famílias de descontinuidades o valor de J_v pode ser encontrado de acordo com a Equação 4.1:

$$J_v = \frac{1}{\sum_{i=1}^n Esp(i)} \quad \text{Equação 4.1}$$

em que:

- J_v – somatório do número de descontinuidades por unidade de comprimento por unidade de comprimento, para o conjunto de famílias
- $Esp(i)$ - corresponde ao espaçamento e
- n - número de famílias de descontinuidades

O número de famílias de descontinuidades condiciona o aspecto do maciço rochoso e o seu comportamento mecânico. A orientação das diferentes famílias condiciona a estabilidade do maciço.

Os valores de RQD podem ser estimados em afloramentos, através do número de descontinuidades por unidade de volume (J_v), de forma aproximada, através da expressão empírica de Palmstrom (1975), Equação 4.2.

Verifica-se que os valores do RQD de acordo com a expressão de Palmstrom (1982) são dependentes do espaçamento e do número de famílias das descontinuidades. O valor de RQD pode mudar significativamente, dependendo da orientação. Uma das

limitações da determinação do RQD através dos ensaios está relacionada com a possível orientação destas, o que pode ser evitado a partir dos cálculos efectuados através do J_v . Por Deere *et al.* (1967) blocos de rocha meteorizados não devem ser considerados para a determinação do RQD (Ferrer, 2002):

$$RQD = 115 - 3.3 \times J_v \rightarrow J_v > 4.5 \quad \text{Equação 4.2}$$

$$RQD = 100 \rightarrow J_v \leq 4.5$$

em que:

- J_v - índice de diaclasamento volumétrico
- RQD - Rock quality designation

É extremamente importante obter um valor de RQD de confiança, devido a ser um valor utilizado em várias classificações geomecânicas. Relações empíricas são muito úteis em regiões onde a topografia é muito irregular e íngreme.

4.1.2 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE ROMANA (SLOPE MASS RATING)

Um dos métodos que se utiliza para avaliar as situações de instabilidade em taludes rochosos, adaptação da classificação de Bieniawski, RMR, é a classificação geomecânica Slope Mass Rating (SMR). Esta classificação requer os mesmos dados e dá uma previsão de problemas de estabilidade e técnicas de apoio para cada classe de estabilidade.

$$SMR = RMR + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad \text{Equação 4.3}$$

em que:

- SMR – Slope mass Rating
- RMR - Rock mass rating
- F1: depende do ângulo relacionado com a direcção do pendor das descontinuidades e do talude
- F2: depende da inclinação das descontinuidades no plano de ruptura.
- F3: reflecte a relação entre os ângulos dos pendores das descontinuidades e do talude.
- F4: empiricamente estabelecido.

Romana (1996) estabeleceu a classificação SMR que é definida a partir da classificação RMR, adicionando um factor de ajuste que resulta do produto de três

subfactores (F1, F2 e F3) (Tabela 4.7). Estes subfactores dependem da orientação das descontinuidades e também da adição de um outro factor de ajuste que está relacionado com o método de escavação ou de desmonte utilizado (F4). O valor do índice SMR é determinado a partir de Romana, Serón e Montalar (2003), Equação 4.3.

Mais em pormenor, através de (Vallejo, 2002):

- F1 está relacionado com o ângulo entre a direcção do pendor das descontinuidades e do talude. Os valores de F1 variam entre 1,0 (para a situação das direcções do pendor das descontinuidades e do pendor serem paralelas) e 0,15 (para a situação do ângulo entre as direcções ser maior que 30°, neste caso a possibilidade de rotura é muito baixa). Estes valores foram estabelecidos empiricamente, mas F1 pode ser encontrado pela Equação 4.4:

$$F_1 = [1 - \sin(\alpha_j - \alpha_s)]^2 \quad \text{Equação 4.4}$$

em que:

- F1: depende do ângulo relacionado com a direcção do pendor das descontinuidades e do talude
 - α_j - valores dos ângulos das direcções de pendor da descontinuidade
 - α_s - valores dos ângulos das direcções de pendor do talude
-
- F2 está dependente do pendor das descontinuidades, e apresenta uma variação entre 1,0 (para descontinuidades cujo pendor é superior a 45° ou que estão associadas à rotura por basculamento) e 0,15 (para descontinuidades cujo pendor é inferior a 20°). F2 também foi estabelecida empiricamente, mas posteriormente verificou-se uma relação, podendo ser calculado pela Equação 4.5:

$$F_2 = \tan^2 \beta_j \quad \text{Equação 4.5}$$

Em que:

- F2: depende da inclinação das descontinuidades no plano de ruptura.
- β_j - ângulo de pendor da descontinuidade.

- F3 permite avaliar a relação entre os ângulos dos pendores das descontinuidades e do talude. Para as roturas planares, F3 está relacionado com a probabilidade das descontinuidades aflorarem na face do talude. Se o pendor médio na família de descontinuidades é igual ao do talude, este é considerado parcialmente estável. Se o talude apresenta um pendor superior a 10° ao pendor das descontinuidades, verifica-se uma situação muito desfavorável. As situações de roturas por basculamento não são consideradas desfavoráveis ou muito desfavoráveis, devido às características destes tipos de instabilidades raramente provocarem roturas muito bruscas.
- F4 é definido a partir dos métodos de desmorte ou de escavação (factor de ajuste corrigido empiricamente) pela Tabela 4.6

O factor de ajuste para o método de escavação, foi fixado empiricamente, como se segue:

Tabela 4.6: Factor de ajuste segundo o método de escavação (F4) (Hudson, 1993)

Método	Talude natural ou vertentes	Desmorte de Pré-corte	Desmorte com explosivos do tipo <i>smooth blasting</i>	Desmorte com explosivos ou escavação mecânica	Desmorte com explosivo deficiente
F4	15	10	8	0	-8

Segue-se a classificação RMR, adicionando um factor de ajuste que resulta do produto de três subfactores (F1, F2 e F3)

Tabela 4.7: Classificação Geomecânica SMR (adaptado de Romana, (1996)) factor de ajustamento para a orientação das descontinuidades (F1, F2, F3)

Tipo de situação		Muito favorável	Favorável	Normal	Desfavorável	Muito desfavorável
P	$ \alpha_j - \alpha_s $	>30	20 - 30	10 - 20	5 - 10	<5
B	$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $					
P/B	F1	0,15	0,4	0,7	0,85	1
P/B	$ \beta_j $	<20	20 - 30	30 - 35	35 - 45	>45
P	F2	0,15	0,4	0,7	0,85	1
B		1	1	1	1	1
P	$\beta_j - \beta_s$	>10	0 - 10	0	0 - -10	<-10
B	$\beta_j + \beta_s$	<110	110 - 120	>120	-	-
P/B	F3	0	-6	-25	-50	-60

Capitulo 4

em que:

- P: ruptura planar
- B: ruptura por basculamento
- As: direcção do pendor do talude
- Aj: direcção do pendor das diáclases
- Bs: pendor do talude
- Bj: pendor das diáclases

Tabela 4.8: Classificação da estabilidade (adaptado de Romana, (1996))

Classe	V	IV	III	II	I
Coesão (MPa)	<0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,3	0,3 - 0,4	0,4
Angulo de atrito (°)	15	15 - 25	25 - 35	35 - 45	>45
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
Descrição	Muito má	Má	Normal	Boa	Muito boa
Estabilidade	Completamente instável	Instável	Parcialmente instável	Estável	Completamente estável
Roturas	Roturas de grandes dimensões por planos contínuos	Roturas planares ou roturas por cunhas de grandes dimensões	Algumas roturas planares ou muitas roturas por cunhas	Alguns blocos	Nenhuma
Sustimento	Re-escavação	Correcção	Sistemático	Ocasional	Nenhum

Na classificação SMR não se avaliam de modo diferenciado as roturas em cunha. O índice SMR deve ser determinado para cada uma das famílias de descontinuidades presentes no talude, o valor mais baixo do índice SMR será o adoptado para o talude.

A meteorização pode ser avaliada com a classificação do maciço rochoso, pois é um processo que depende do tempo, dependente do clima e da mineralogia da rocha. A classificação deve ser aplicada duas vezes; uma para a rocha no estado inicial, e outra para a situação de rocha alterada (Ferrer, 2002; Hudson, 1993).

Diferentes medidas correctivas podem ser aplicadas para sustentar uma encosta instável, em função das cinco classes distintas de índices SMR de estabilidade, Tabela 4.8. O estudo de uma encosta potencialmente instável é uma tarefa difícil que exige trabalho de campo cauteloso, uma análise detalhada e bom senso na engenharia, a fim de compreender a importância relativa dos vários factores de

instabilidade que actuam sobre a encosta. O procedimento consiste em obter o índice SMR para cada família de descontinuidades e adoptar o menor valor dos obtidos.

As diferentes medidas de estabilização a aplicar nos taludes são agrupadas em 6 diferentes classes, Tabela 4.9.

As classificações geomecânicas são uma ferramenta importante no mapeamento geotécnico, ao classificar amostras de rocha a nível da sua alteração, caracterizando como rochas fracas ou em bom estado (Zenóbio, et al., 2006).

Tabela 4.9: Valor SMR para diferentes tipos de rotura e respectivos métodos de suporte (Romana, et al., 2003))

Ruptura planar	Grande					Alguma					Nenhuma			
Basculamento						Grande	Alguma	Mínima			Nenhuma			
Queda de blocos	Possível					Nenhuma								
SMR	0 - 15	15 - 20	20 - 25	25 - 30	30 - 35	35 - 40	40 - 45	45 - 50	50 - 55	55 - 60	60 - 65	65 - 70	70 - 75	75 - 80
Reescavação	Modificação da geometria do talude e muros de contenção													
Drenagem	Drenagem superficial ou profunda													
Betão	Colocação de betão (betão projectado, contrafortes, muros no pé do talude)													
Reforço						Reforço do talude (pregagens, ancoragens)								
Protecção								Protecção do talude (redes metálicas, valas no pé dos taludes, protecção no pé dos taludes)						
Não aplicado											Não são aplicadas medidas de estabilização (possível retirada dos blocos instáveis)			

No projecto geotécnico não é possível a obtenção de resultados fiáveis, sem uma rigorosa caracterização dos parâmetros dos materiais envolvidos. Devido à variabilidade dos maciços, a avaliação das propriedades geotécnicas é o aspecto

sobre o qual, recai o maior grau de incerteza. O EC7 preconiza que o valor característico de uma propriedade deve ser entendido, como uma estimativa cautelosa do seu valor médio e que a sua avaliação deve também basear-se na experiência e no risco inerente à obra.

Nos maciços rochosos o processo de caracterização resulta da combinação de ensaios *in situ* e em laboratório com a aplicação de sistemas empíricos. Em maciços heterogêneos a caracterização geomecânica complica-se substancialmente e a definição determinística dos parâmetros não traduz convenientemente o seu comportamento.

4.2 CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS

Ao longo dos anos, o estudo de estruturas executadas em maciços rochosos, vem avançando de maneira cada vez mais intensa, frente à demanda crescente do homem em busca de conforto e segurança nas suas estruturas e vias de comunicação, ou seja, em busca de novos horizontes para o seu próprio desenvolvimento.

Uma adequada caracterização geotécnica dos maciços rochosos compreende a caracterização geológica e a caracterização geomecânica. A caracterização geológica é iniciada, geralmente, por um reconhecimento de superfície. O número de sondagens a realizar deve permitir uma amostragem representativa do maciço e da rocha constituinte em estudo, assim como, das formações geológicas e dos seus estados de alteração e das famílias de descontinuidades ocorrentes no maciço.

A caracterização geomecânica do maciço rochoso e das rochas constituintes é feita mediante ensaios de campo e ensaios em laboratório. Os tipos de ensaio a realizar para uma boa caracterização geomecânica respeita desde as características, à deformabilidade e resistência constituintes desse maciço (Costa e Silva, et al., 2001).

Uma criteriosa selecção dos ensaios de campo permite quantificar a deformabilidade das diferentes formações geológicas do maciço, sem recurso a um número excessivo de ensaios no campo.

Contudo, o maciço rochoso que, a princípio, parece ser de excelente execução, apresenta irregularidades e falhas às quais são conhecidas como descontinuidades. Descontinuidade refere-se às irregularidades observadas nos maciços rochosos.

4.2.1 PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E DESCONTINUIDADES

Na análise à estabilidade de uma encosta, o factor mais importante a ser considerado é a geometria do maciço. A relação geométrica entre as descontinuidades no maciço, a inclinação e a orientação das descontinuidades irá determinar a sua estabilidade. Para uma avaliação realista da estabilidade da estrutura, a estimativa da resistência ao corte de um maciço rochoso ao longo de qualquer plano ou então através da descontinuidade mais fraca, torna-se essencial (Singh, et al., 1999).

A escolha adequada dos valores de resistência não depende apenas da disponibilidade da recolha de dados de teste, mas também numa interpretação cuidadosa destes dados em função do comportamento do maciço rochoso, que compõe a encosta.

O valor de resistência ao corte depende dos mecanismos que podem alterar as características do maciço rochoso. As diferenças nos valores de resistência ao corte podem ocorrer por causa da influência da alteração das rochas, da rugosidade das superfícies, da presença de água sob pressão e devido às diferenças de escala entre a superfície testada (Hoek, et al., 1981).

4.2.1.1 Caracterização das descontinuidades

Descontinuidade descreve-se como a separação entre os maciços rochosos, com a tensão pouca ou nula quanto à resistência à tracção, sendo este um plano de fraqueza (Bell, 2007). A instabilidade do talude deve-se directamente às características das famílias de descontinuidades, às quais, são analisadas na geotecnia, analisando as presentes nos taludes. Desta forma, a superfície de ruptura destes maciços tende a seguir as descontinuidades preexistentes e, portanto, não ocorrem através da rocha intacta, a não ser que a rocha seja muito fraca.

O modelo estrutural de um maciço rochoso representa a distribuição espacial das descontinuidades e suas características geométricas, o que permite reconhecer quais as mais importantes no condicionamento do comportamento do maciço.

A correcta descrição das diferentes famílias de descontinuidades é de grande importância, porque rege a deformabilidade do maciço, a resistência e a permeabilidade, por isto é necessário desenvolver uma profunda compreensão das propriedades geométricas, mecânicas e hidrogeológicas do um maciço rochoso.

a. Orientação

Na caracterização geotécnica dos maciços rochosos, para além do reconhecimento das formações geológicas, deve-se proceder ao estudo das descontinuidades, tendo em atenção a definição da sua orientação.

As atitudes das descontinuidades são definidas por dois parâmetros: a direcção e o pendor. Na determinação da atitude deve utilizar-se uma bússola com um clinómetro (Ferrer, et al., 1999).

Pendor é o ângulo (0 a 90°) inserida no plano de descontinuidade, formado entre a linha perpendicular ao traço e a projecção desta ao plano de observação. O traço é a linha de intersecção da descontinuidade com o plano de observação. Mede-se através do clinómetro.

A direcção do pendor é o ângulo (0 a 360°) medido no sentido horário, ou anti-horário podendo, eventualmente, ser necessário efectuar a correcção da medida, entre o norte magnético e a linha no plano de observação perpendicular ao traço.

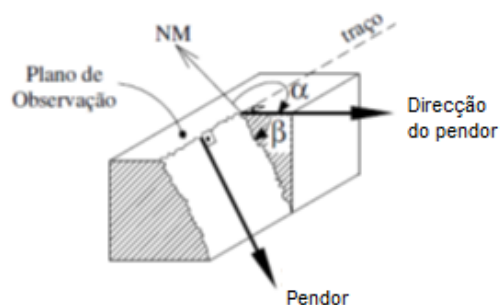


Figura 4.2: Orientação da descontinuidade onde α é a direcção do pendor e β o pendor (Ferrer, 2002).

A representação gráfica das coordenadas das descontinuidades pode efectuar-se através de projecção estereográfica, diagramas de roseta, representações tridimensionais ou de símbolos em mapas geológicos. Na Figura 4.2, representa-se um plano de descontinuidade e as suas coordenadas são definidas em termos de pendor e direcção do pendor.

b. Espaçamento e espessura das camadas

O estado de fracturação de um maciço rochoso é, basicamente, o espaçamento médio medido na perpendicular entre as suas diaclases, enquanto a espessura das camadas, é a distância entre a base e o topo da camada.

Espaçamento refere-se, usualmente, à média ou ao espaçamento modal de um conjunto de descontinuidades. Os espaçamentos das descontinuidades condicionam o tamanho dos blocos individuais de rocha intacta, influenciando o comportamento do maciço rochoso (Ferrer, et al., 1999).

Tabela 4.10: Classificação do espaçamento das descontinuidades (ISRM, 1981).

Descrição	Espaçamento (m)
Extremamente próximas	<0,02
Muito próximas F5	0,02 – 0,06
Próximas F4	0,06 – 0,2
Moderadamente próximas F3	0,2 – 0,6
Afastadas F2	0,6 - 2
Muito afastadas F1	2 - 6
Extremamente afastadas	>6

Os principais factores que condicionam o espaçamento das descontinuidades são as tensões de origem tectónica, a litologia e também a profundidade a que se encontram as formações que contêm as descontinuidades. Normalmente, este valor refere-se ao espaçamento médio ou modal dos valores medidos para uma família de descontinuidades.

De modo geral, a definição do espaçamento das descontinuidades, que contém os intervalos de RMR, é apresentado na Tabela 4.10:

Segundo ISRM, foram adoptados valores idênticos para os limites das várias classes da espessura das camadas. A designação das classes encontra-se na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Classificação da espessura das camadas (ISRM, 1981).

Descrição	Espaçamento (m)
Muito delgadas L5	<0,06
Delgadas L4	0,06 – 0,2
Moderadamente espessa L3	0,2 – 0,6
Espessas L2	0,6 - 2
Muito espessas L1	> 2

Através de Ferrer, *et al.*, (1999), o espaçamento entre descontinuidades tem um papel importante na permeabilidade do maciço. Em geral, a condutividade

hidráulica de uma família de descontinuidades é inversamente proporcional ao espaçamento.

c. Continuidade

A continuidade ou persistência corresponde à maior extensão de um plano de descontinuidade conforme observado num afloramento. A sua quantificação é feita nas superfícies expostas do maciço medindo-se o comprimento do traço da superfície das descontinuidades. É de extrema importância mas de difícil quantificação. Giani (1992) sustenta que, a teoria para a concepção de que o maciço rochoso é um sistema de blocos separados por planos de descontinuidades, apresenta-se como sendo a mais coerente. Um plano de descontinuidade não apresenta qualquer segmento completamente intacto ou completamente separado. O plano que contém a descontinuidade cruza regiões de rocha intacta.

Tabela 4.12: Descrição das descontinuidades (ISRM, 1981)

Continuidade	Comprimento
Muito baixa continuidade	<1m
Baixa continuidade	1-3m
Continuidade media	3-10m
Alta continuidade	10-20m
Muito alta continuidade	>20m

A persistência tem uma grande influência no comportamento geomecânico dos maciços rochosos, designadamente na sua resistência. A determinação da continuidade está relacionada com a dimensão dos afloramentos rochosos ou taludes em que estão presentes as descontinuidades, tornando-se difícil a sua determinação, quando estas se desenvolvem para o interior do maciço rochoso. A continuidade define a matriz rochosa, os processos de ruptura e a resistência do maciço rochoso (Ferrer, et al., 1999).

Procedeu-se à caracterização da persistência das descontinuidades, Tabela 4.12, que foi posteriormente adoptada na classificação RMR de (Bieniawski, 1989), Tabela 4.1.

d. Rugosidade

Uma superfície de descontinuidade apresenta irregularidades e ondulações relativas ao plano médio de uma descontinuidade, que condicionam o seu comportamento de resistência tangencial. As ondulações influenciam a direcção de movimento que pode ocorrer ao longo de uma superfície de descontinuidade. As rugosidades

correspondem a irregularidades superficiais que estão relacionadas com o atrito entre as paredes das descontinuidades.

Para a determinação da rugosidade do maciço existem diversos métodos dependendo da precisão requerida, da escala e da acessibilidade do afloramento, obtendo desde estimativas qualitativas até medidas quantitativas (Ferrer, et al., 1999). De acordo com o ISRM (1981), podem utilizar-se perfis típicos de rugosidade com duas escalas de observação: a pequena (em centímetros; irregularidades de superfície, detectáveis a pequena escala: rugosa, lisa e espelhada) e a intermédia (alguns metros; patamar, ondulada e planar) que resulta na combinação de nove classes (Figura 4.3).

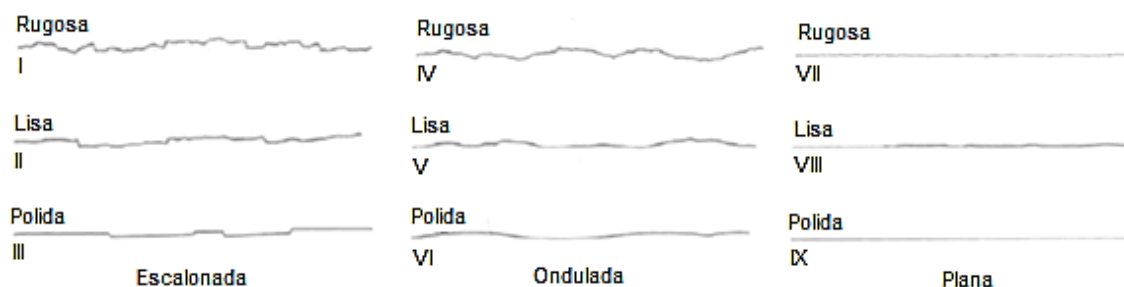


Figura 4.3: Perfis típicos de rugosidade e respectivas classificações (ISRM, 1981).

A escala intermédia da rugosidade é constituída por três graus (em escadaria ou denteada, ondulada e planar), enquanto a rugosidade de pequena escala pode ser considerada como rugosa, lisa e estriada, este último caso relacionado com movimentações de planos de falha. A importância da rugosidade diminui à medida que aumenta a abertura, com a espessura do relevo ou com o material de preenchimento (Ferrer, et al., 1999).

e. Abertura

A abertura é a distância medida na perpendicular, entre as superfícies adjacentes de uma descontinuidade, considerando que o interior pode estar preenchido com ar ou água ou então vazio (ISRM, 1978). A abertura tem uma influência determinante na condutividade hidráulica dos maciços rochosos e na resistência ao deslocamento das descontinuidades. Muitas vezes, os valores da abertura das descontinuidades têm valores cujas dimensões são inferiores a 1 mm, verificando-se para o interior dos maciços rochosos uma tendência para que a abertura seja muito reduzida ou mesmo nula (Ferrer, et al., 1999). Procedeu-se à classificação da abertura das

descontinuidades em cinco classes de acordo com a Tabela 4.1: Classificações geomecânica RMR (adaptação de Bieniawski (1989)). A actual abertura de uma descontinuidade não coincide com a sua abertura original, podendo ser modificada em estágios posteriores à sua formação, como ocorre no processo de erosão (Maia, 2003).

As medições têm que ser feitas para cada família de descontinuidades, citando os valores médios e/ou modais de cada uma delas. Muitos estudos geotécnicos adoptam, para a definição dos valores da abertura, os intervalos da classificação da Tabela 4.13, esta última classificação apresenta um número superior de classes relativamente à Classificações geomecânica RMR (adaptação de Bieniawski (1989)).

Tabela 4.13: Classificação da abertura das descontinuidades (ISRM, 1981).

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

f. Material de preenchimento

O enchimento corresponde ao material presente no interior das superfícies das descontinuidades, o qual usualmente é mais fraco que a rocha de origem (Giani, 1992). A distância perpendicular entre as paredes é chamada de abertura de descontinuidade preenchida.

Verifica-se uma grande variação das características físicas e mecânicas do material de preenchimento que pode ser material arenoso, argiloso, quartzoso, calcítico ou do tipo brecha. As características e espessura do material de preenchimento condicionam o comportamento das descontinuidades, e a sua condutividade hidráulica. Nos estudos geotécnicos é comum a definição da natureza, espessura, resistência tangencial e permeabilidade do material de preenchimento. (Tabela 4.1: Classificações geomecânica RMR (adaptação de Bieniawski (1989))).

g. Estado de alteração

A alteração está relacionada com modificações físicas e químicas do material rochoso que são, muitas vezes, provocadas por agentes de meteorização. As superfícies de paredes não alteradas têm uma resistência similar à da rocha intacta. O aumento do grau de alteração do material rochoso provoca uma diminuição da sua resistência. As diferentes classes de caracterização do estado de alteração, que foram utilizadas, vão desde a ausência da alteração até à definição do material rochoso como decomposto na Tabela 4.1: Classificações geomecânica RMR (adaptação de Bieniawski (1989)).

O estado de alteração das superfícies das discontinuidades foi definido através da observação e pela utilização do martelo de geólogo, da compressão manual ou do martelo de Schmidt, este último permite efectuar uma determinação expedita da resistência das superfícies de discontinuidade.

Um dos factores que mais influenciam a resistência é a meteorização, devido afectar as superfícies de discontinuidade da matriz rochosa, onde actuam os fenómenos de alteração (Ferrer, et al., 1999).

h. Presença de água

Percolação está relacionada com o fluxo de água e humidade livre, visível em discontinuidades individuais ou no maciço rochoso de modo geral. A água é um dos agentes mais importantes na erosão dos solos e na alteração das rochas.

A abertura e o tipo de material de preenchimento das discontinuidades condicionam de modo determinante a percolação da água. A idade e a origem das discontinuidades são importantes para a avaliação da percolação da água. As discontinuidades de origem recente permitem a percolação da água mais facilmente, pois elas ainda não foram cimentadas nem obstruídas pelo material de preenchimento (material fino) (Giani, 1992).

O estudo da percolação no interior das discontinuidades tem uma importância fundamental, pois as condições de equilíbrio de taludes rochosos também dependem da distribuição da pressão hidráulica, ao longo dos planos dessas discontinuidades. O gradiente de pressão hidráulica ao longo de uma discontinuidade depende da quantidade de água que passa por esta e da sua condutividade hidráulica.

De acordo com a classificação da ISRM (1981), pode proceder-se à distinção da percolação em descontinuidades sem enchimento e com material de preenchimento (Tabela 4.14).

Tabela 4.14: Descrição de presença de água nas descontinuidades (adaptada ISRM, 1981)

Classe	Descontinuidade sem enchimento	Descontinuidade com enchimento
I	Fractura muito plana e fechada Descontinuidades aparecem secas e sem possibilidade de circulação de água	Enchimento muito consolidado e seco Não é possível a circulação de água
II	Fractura seca e sem evidência de circulação de água	Enchimento muito consolidado e seco. Não é possível a circulação de água
III	Fractura seca e com evidências percolação de água	Enchimento húmido e com presença de gotas ocasionais
IV	Fractura húmida, sem circulação de água livre	Enchimento que mostra evidências de lavagem e com fluxo de água continua
V	Fractura, ocasionalmente gotejando, mas sem fluxo continuo	Enchimento localmente lavado e com fluxo considerável
VI	Fractura com fluxo contínuo de água	Enchimento completamente lavado e com pressões de água elevadas

4.2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DAS ROCHAS

Para a caracterização detalhada dos componentes do maciço rochoso, a partir da visualização de afloramentos, descontinuidades, devem ser considerados outros factores tais como:

4.2.2.1 Número e orientação das descontinuidades

O número de famílias de descontinuidades condiciona o comportamento mecânico do maciço, assim como o seu aspecto. A orientação das descontinuidades das diferentes famílias influencia, também, a estabilidade do mesmo.

A intensidade do grau de fracturação e o tamanho dos blocos são obtidos através do número de família de descontinuidades e através do seu espaçamento.

O maciço pode classificar-se consoante o número de famílias, segundo a Tabela 4.15, variando entre maciços rochosos massivos com uma única família de

descontinuidade ou então com quatro ou mais famílias de descontinuidades, sendo este último um maciço muito fracturado (Ferrer, 2002).

A análise da orientação e identificação das famílias de descontinuidades, ou descontinuidades singulares, pode determinar blocos de rocha potencialmente instáveis.

Tabela 4.15: Classificação de maciços rochosos pelo número de famílias de descontinuidades (ISRM, 1981)

Tipo de maciço rochoso	Número de famílias
I	Massivo, descontinuidades ocasionalmente
II	1 família de descontinuidades
III	1 família de descontinuidades e outras ocasionais
IV	2 famílias de descontinuidades
V	2 famílias de descontinuidades e outras ocasionais
VI	3 famílias de descontinuidades
VII	3 famílias de descontinuidades e outras ocasionais
VIII	4 famílias de descontinuidades
IX	Brechas

4.2.2.2 Tamanho dos blocos

O tamanho dos blocos condiciona de forma decisiva o seu comportamento e as suas propriedades resistentes, assim como as deformações. A dimensão e forma destes estão definidas pelo número de famílias de descontinuidades, pela orientação, espaçamento e continuidade (Vallejo, 2002).

A descrição do tamanho dos blocos pode-se realizar pelas seguintes formas:

- Mediante o tamanho do bloco I_b , que representa as dimensões médias dos blocos medidos no afloramento, Equação 4.6.
- Através do número total de descontinuidades, que interceptam uma dada área, 1 m^3 , do maciço rochoso, definido através do parâmetro J_v .

- Devido à dificuldade em estimar tridimensionalmente, as descontinuidades de um afloramento que cruzam uma dada área do maciço rochoso, o valor de J_v pode ser determinado pelo número de descontinuidades por unidade de comprimento, considerando as diferentes famílias presentes na área medida, medindo perpendicularmente a direcção de cada uma delas, Equação 4.7.

$$I_b = \sum_{i=1}^n \frac{e_n}{n_j} \quad \text{Equação 4.6}$$

em que:

- I_b - dimensões médias dos blocos.
- e - valores médios do espaçamento das famílias de descontinuidades
- n_j - numero total de famílias.

O comprimento através do qual as descontinuidades são medidas depende do espaçamento de cada família, e deve passar por tantas quanto possível. Pode estimar-se de igual forma, o valor de J_v para cada família (Ferrer, 2002).

$$J_v = \sum \frac{n_j}{L_n} \quad \text{Equação 4.7}$$

em que:

- J_v – índice de descontinuidades
- n_j - numero de descontinuidades
- L_n - comprimento das descontinuidades

Tabela 4.16: Descrição do tamanho do bloco em função do número de descontinuidades (ISRM, 1981)

Descrição	J_v (descontinuidade/m ³)
Blocos muito grandes	<1
Blocos grandes	1 - 3
Blocos de tamanho médio	3 - 10
Blocos pequenos	10 - 30
Blocos muito pequenos	>30

O valor de J_v relaciona-se com o tamanho dos blocos, segundo a Tabela 4.16, em que os valores de $J_v > 60$ representam uma brecha.

Em função da forma, do tamanho do bloco e da intensidade de fracturação, pode ser estimada a caracterização do maciço rochoso através da Tabela 4.17.

Tabela 4.17: Classificação de maciços rochosos em função do tamanho e forma dos blocos (ISRM, 1981)

Classe	Tipo	Descrição
I	Massivo	Poucas descontinuidades ou com espaçamento muito grande
II	Cubico	Blocos aproximadamente equidimensionais
III	Tubular	Blocos com uma dimensão inferior em relação às outras duas
IV	Colunar	Blocos com uma dimensão superior em relação às outras duas
V	Irregular	Grandes variações no tamanho e forma dos blocos
VI	Triturado	Maciço rochoso muito fracturado

4.2.2.3 Grau de decomposição

A avaliação do grau de meteorização do maciço realiza-se por observação directa do afloramento e comparando com outros índices, Tabela 3.1: Classificação da alteração do maciço rochoso de acordo Geological Society (London) Engineering Group Working Party 1977. O grau de fracturação varia entre W1 – Sã e W5 – decomposto.

Ocasionalmente será necessário fragmentar parte do maciço a fim de observar a meteorização do maciço rochoso.

4.2.2.4 Fracturas

A fracturação do maciço está associada ao número e condições das fracturas que afectam os materiais geológicos. Estas condições incluem, sobretudo, a densidade de fracturas, espaçamento e condições das descontinuidades, qualquer que seja a origem ou classe. A fracturação inclui todos os planos de descontinuidade que afectam o maciço (Ferrer, et al., 1999).

A descrição da fracturação pode referir-se ao número de famílias, e ao tamanho dos blocos. Pode também definir-se a intensidade de fracturação, obtida pela abertura

entre descontinuidades. O grau de fracturação do maciço expressa-se a partir do índice RQD, (ver 4.1.1.2). Através do seu valor, classifica-se a qualidade do maciço rochoso.

Apesar de ser extremamente útil, o índice RQD não considera aspectos como a orientação, abertura, preenchimento e outras condições de descontinuidades, pelo que não é suficiente para descrever as características da fracturação do maciço. Estes aspectos adicionais devem ser acompanhados por descrições de campo e dos ensaios. A descrição da fracturação a partir de dados de afloramentos pode, ainda, referir-se ao número de famílias de descontinuidades e ao tamanho dos blocos. (Ferrer, 2002).

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma metodologia de classificação deve ser constituída por duas fases: a de caracterização geotécnica (onde são determinados os parâmetros geológicos e geomecânicos mais pertinentes) e a da selecção dos parâmetros geotécnicos (atribuindo-lhes diferentes pesos, consoante a sua relevância para o caso em análise, parâmetros importantes no estudo do comportamento da obra).

Uma adequada caracterização geotécnica dos maciços rochosos, permite aos responsáveis definir os processos de construção mais adequados. Apresentaram-se assim critérios, não rígidos, para a caracterização geotécnica dos maciços rochosos, no sentido de minimizar riscos potenciais e efectivos de ocorrência de acidentes estruturais durante a construção das obras (Costa e Silva, et al., 2001)

5 ESTABILIDADE DE MACIÇOS ROCHOSOS

Os fenómenos de instabilidades de taludes e vertentes provocam, de modo frequente, vítimas humanas e danos materiais. Os deslizamentos ocorrem com maior frequência nos períodos de pluviosidade mais elevada.

A instabilidade dos taludes ou vertentes de maciços rochosos não se limita à queda de blocos, devendo considerar-se os processos geodinâmicos que afectam a superfície terrestre que provocam movimentos de massa de características diversas, atingem velocidades e dimensões consideráveis e podem constituir riscos geológicos (Vallejo, 2002).

Para compreender e prevenir este tipo de situações decorrentes da instabilidade é necessário conhecer as características das formações e das estruturas geológicas, bem como os mecanismos que podem conduzir à instabilidade dos taludes. Deste modo a define-se as medidas de prevenção e estabilização mais correctas a aplicar num talude, no sentido de garantir a estabilidade e as condições de segurança do mesmo.

5.1 CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE MOVIMENTOS DE VERTENTE

As classificações dos tipos de instabilidade de vertentes ou taludes são efectuadas, de modo geral, em termos do tipo de material, velocidade, mecanismo, tipo de rotura, volume do material envolvido e profundidade da superfície de rotura. A estabilidade do talude é influenciada, além da altura e inclinação, pelo comportamento mecânico do terreno como a resistência e deformabilidade.

De acordo com Varnes (1978), que apresenta uma classificação de aplicação prática, baseada em dois critérios; o tipo de mecanismo e a natureza do material (solo ou rocha), os movimentos podem ser classificados em desmoronamentos, deslizamentos, basculamentos (toppling), fluxos, expansão lateral e movimentos complexos (Telford, et al., 1991). Existe ainda classificações baseadas no volume de materiais movimentados e no tipo de ruptura ocorrido.

A classificação dos movimentos de instabilidade de taludes ou vertentes pode ser efectuada de acordo com a sua velocidade (Tabela 5.1) e também tendo em atenção a profundidade máxima da superfície de rotura (Tabela 5.2).

Tabela 5.1: Classificação da velocidade de movimentos nos taludes

Movimento	Velocidade
Extremamente rápido	> 5 m/s
Muito rápido	> 3 m/min
Rápido	> 1,8 m/h
Moderado	> 1,3 m/mês
Lento	> 1,6 m/ano
Muito lento	> 1,6 mm/ano
Extremamente lento	<1,6 mm/ano

A velocidade com que se produz o movimento depende da inclinação do talude, da forma da superfície de rotura e das propriedades físicas dos materiais.

Tabela 5.2: Classificação dos movimentos nos taludes em termos da profundidade máxima da superfície de rotura.

Tipo de deslizamento	Profundidade máxima (m)
Superficial	<1.5
Pouco profundo	1.5 a 5
Profundo	5 a 20
Muito profundo	> 20

O risco envolvido nos escorregamentos depende da sua maior ou menor probabilidade de ocorrência e da importância dos danos resultantes. A perigosidade depende da zona em que pode originar-se o movimento. Também depende da velocidade com que se produz o movimento e do volume envolvido neste. Geralmente estes três parâmetros correlacionam-se, e são determinantes para atribuir uma perigosidade ao maciço.

5.2 TIPOS DE INSTABILIDADE DE VERTENTE

As classificações dos tipos de instabilidade de vertentes ou taludes são efectuadas, de modo geral, em termos do tipo de material, velocidade, mecanismo, tipo de rotura, dimensão do material envolvido e profundidade da superfície de rotura.

A instabilidade dos taludes ou vertentes de maciços rochosos não se limita à queda de blocos, devendo se considerar os processos geodinâmicos que afectam a superfície terrestre que provocam movimentos de massa de características diversas. A instabilidade pode constituir riscos geológicos, devido a atingir velocidades e dimensões consideráveis num possível derrubamento.

Os diferentes tipos de roturas estão condicionados pelo grau de fracturação do maciço e pela orientação e distribuição de descontinuidades em relação à estabilidade de taludes. Os parâmetros de resistência das descontinuidades e da matriz rochosa definem o tipo de estabilidade.

Em maciços rochosos resistentes as descontinuidades determinam a situação dos planos de rotura. Nos maciços formados por rochas menos resistentes, a matriz rochosa também desempenha um papel importante na geração dos planos e mecanismos de rotura (Vallejo, 2002). A estabilidade do talude pode ser classificada da seguinte forma:

- Classe I – completamente estável, sem fracturas
- Classe II – estável, com algumas fracturas no bloco
- Classe III – parcialmente estável, ruptura planar em algumas zonas
- Classe IV – instável, grandes rupturas em cunha ou ruptura planar em muitos sítios
- Classe V – completamente instável, grandes rupturas planar

Normalmente, nas obras geotécnicas de engenharia civil torna-se necessário a análise de estabilidade dos maciços rochosos à resistência ao corte. A instabilidade dos taludes resulta da atitude (direcção do pendor e pendor) desfavorável e crítica do mesmo e da distribuição espacial e frequência das várias descontinuidades presentes na rocha em questão. Também as características físicas do maciço rochoso, a presença de zonas de corte e fracturas (zonas de fraqueza), o mecanismo de ruptura da rocha e a presença da água afectam as estruturas escavadas em rocha.

A análise cinemática de taludes em rocha refere-se à possibilidade de movimentação dos corpos rochosos sem fazer, entretanto, referência às forças que causam o movimento. A escavação dos taludes modifica a condição inicial de estabilidade, muito embora os maciços rochosos já contêm planos de fraqueza, porém, sem liberdade de movimentação.

A estabilidade dos taludes será analisada tendo-se por base as atitudes dos planos de fraqueza, fracturas e planos de corte, em relação à atitude do próprio talude em questão, levando-se em consideração, ainda, o ângulo de atrito ou de fricção actuante ao longo dos planos de descontinuidade.

Torna-se necessário a identificação dos modos potenciais de escorregamento para a análise de estabilidade e entendimento do comportamento dos taludes. De acordo com Hoek e Bray (1981), as instabilizações dos taludes rochosos podem ser classificadas em quatro tipos principais; escorregamentos planares, escorregamentos em cunha, tombamentos de blocos e escorregamentos rotacionais ou curvilíneos, sendo estes últimos frequentes em rochas muito decompostas.

É importante na elaboração da análise considerar sempre o plano que representa o talude, já que a ruptura somente poderá ocorrer como consequência do movimento em direcção à face livre do mesmo. Além disso, a identificação das estruturas que representam os planos potenciais de ruptura auxilia no entendimento do mecanismo de ruptura.

A instabilidade dos taludes traduz-se numa série de movimentos, que podem ser classificados segundo diversos critérios. A fase de reconhecimento e classificação do tipo de movimento é de grande importância, já que pode condicionar a análise e prever o controlo e a estabilidade do mesmo. O tipo de fractura é condicionado pela orientação da escavação e do ângulo de inclinação da encosta. Os tipos mais conhecidos de deslocamentos são os seguintes: desmoronamentos, “toppling”, deslizamentos, fluxos, expansão lateral e movimentos complexos.

5.2.1 DESPRENDIMENTOS (ROCK FALL)



Figura 5.1: Desmoronamento de rochas (Fonte: landslides.usgs.gov)

Consiste na ruptura de blocos rochosos individualizados por planos, seguindo-se a sua queda, Figura 5.1. Os planos são muitas vezes diáclases preexistentes e/ou fendas de tracção, estas últimas aparecem no interior dos taludes e são aproximadamente paralelas à face destes. As quedas de blocos podem igualmente ocorrer quando existe

camadas mais brandas intercaladas em estratos de maior resistência, podendo verificar-se por erosão do material mais brando. O movimento ocorre por queda livre, saltando e rolando. A condição necessária para ocorrer a rotura são as camadas serem esbeltas em relação à altura do talude (Vallejo, 2002).

As razões que podem originar desmoronamentos são:

- Altura excessiva do talude
- Existência de forças externas aplicadas nas camadas do maciço
- Geometria desfavorável das camadas
- Concentração desfavorável de tensões.

A queda de blocos rochosos individualizados está muitas vezes relacionada com as situações de instabilidade designadas como deslizamentos e são fortemente influenciados pela gravidade, meteorização física do maciço e a presença de água.

5.2.2 *DESLIZAMENTOS*

Os deslizamentos caracterizam-se por ter superfície de deslizamento. São movimentos, cuja velocidade é geralmente classificada como de moderada (velocidades superiores a 1,3 m/mês) a muito rápida (velocidades superiores a 3 m/min) e que se verificam em solos ou ao longo de descontinuidades de maciços rochosos.

Nas zonas montanhosas são frequentes os deslizamentos de grandes dimensões que podem causar a obstrução de vales e de linhas de água, bem como provocar a destruição de povoações e de infra-estruturas. Os deslizamentos podem ser planares, em cunha ou rotacionais.

Considera-se que só existe possibilidade de rotura planar ou em cunha, quando as inclinações das descontinuidades ou das cunhas por elas definidas, tiverem inclinações superiores ao ângulo de atrito.

5.2.2.1 **Ruptura Planar**

Os deslizamentos que ocorrem nos maciços rochosos estão relacionados com as superfícies de descontinuidade preexistentes, designadamente com as características destas últimas como a orientação, a rugosidade, o espaçamento, a persistência e a presença da água.

A condição básica é a presença de descontinuidades com pendor na mesma direcção que o talude ($\Psi > \Psi_c$) e o pendor deve ser maior que o seu ângulo de atrito interno ($\Psi_c > \phi$), Figura 5.2 (Vallejo, 2002).

As dimensões das estruturas planar podem variar desde descontinuidades de pequena persistência, que controlam deslizamentos de blocos de dezenas de metros cúbicos, a grandes descontinuidades que levam a deslizamentos de milhares de metros cúbicos de rocha.

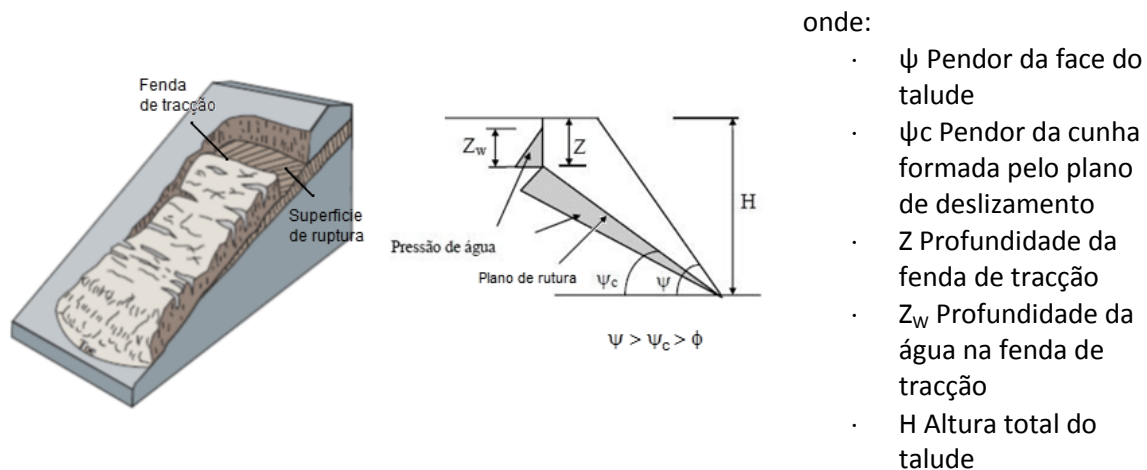


Figura 5.2: Geometria de uma ruptura por escorregamento segundo estruturas planar (adaptado por (Hoek, et al, 1981))

Segundo Hoek e Bray (1981) as condições preliminares necessárias para a ocorrência dos escorregamentos planares são:

- A direcção do plano de deslizamento deve ser praticamente paralela à direcção da face do talude, com uma diferença máxima de 20° em relação ao rumo do mergulho da face do talude.
- Em condições drenadas, o ângulo de mergulho do plano de deslizamento deve ser maior que o ângulo de atrito daquele plano.
- O plano de deslizamento deverá aflorar na face do talude, ou seja, o ângulo de mergulho da descontinuidade deve ser menor que o ângulo de inclinação da face do talude.
- Devem existir outros planos de descontinuidades perpendiculares à face do talude, com resistência desprezível, que levam a formação de um bloco distinto junto com a descontinuidade principal, permitindo seu livre escorregamento.

A presença de água subterrânea nos planos de descontinuidades, ou nas fendas de tracção em blocos rochosos, pode afectar a estabilidade do maciço rochoso. A água nos planos de deslizamento reduz a resistência ao corte, enquanto a água acumulada nas fendas de tracção aumenta as forças que incitam ao escorregamento. Além disso, a água auxilia no processo de meteorização, levando a uma progressiva perda da resistência do material. Onde existir a possibilidade de ocorrência de deslizamentos planares, é importante controlar as águas subterrâneas e superficial.

5.2.2.2 Ruptura por Cunha

A análise cinemática de rotura de cunhas pode ser efectuada de maneira similar ao das roturas planares. Corresponde a um tipo particular dos deslizamentos planares, mas em forma de cunha. Para o caso de escorregamentos de cunhas Hoek, *et al.*, (1981), considera superfícies de pelo menos dois conjuntos de planos que se intersectam, sendo a inclinação das superfícies de deslizamento definida pela geometria da cunha.

Para que ocorra o escorregamento da cunha é necessário que a linha de intersecção, que representa a direcção do deslizamento, aflore na superfície livre do talude em um ângulo de inclinação superior ao ângulo de atrito interno ($\Psi_i > \phi$). Este tipo de ruptura geralmente ocorre em maciços com duas ou mais famílias de descontinuidades, cuja orientação, espaçamento e continuidade determina a forma e o volume da cunha (Vallejo, 2002).

Para o deslizamento em cunha as seguintes condições devem ser observadas:

- Haverá o escorregamento ao longo da linha de intersecção se a sua inclinação (plunge) for menor que o ângulo de inclinação aparente da face do talude.
- As superfícies de deslizamento deverão intersectar ou aflorar no talude.
- A linha de intersecção dos dois planos de deslizamento deverá aflorar no talude.
- O caimento da linha de intersecção deverá ser maior que o ângulo de atrito dos planos.

Essas regras são bastante importantes, pois garantem que o escorregamento se dará ao longo da linha de intersecção da cunha formada, mobilizando a resistência ao corte dos dois planos das respectivas descontinuidades.

5.2.2.3 Deslizamentos Rotacionais

Os movimentos ocorrem ao longo de uma ou várias superfícies de escorregamento cuja concavidade se apresenta voltada para cima. Geralmente ocorre com pouca velocidade.

Os deslizamentos rotacionais aparecem em taludes constituídos por solo ou material rochoso com um grau de fracturação e/ou de alteração muito elevado, podem igualmente ocorrer em maciços constituídos por rochas brandas, que apresentam comportamento isotrópico e de onde os planos de descontinuidade não controlam o comportamento mecânico, comportando-se como solo (Vallejo, 2002).

As áreas dos deslizamentos rotacionais são muito variáveis desde alguns metros quadrados até vários hectares (Dikau *et al.*, 1996). A origem dos deslizamentos rotacionais está geralmente associada a fracturas de tracção que ocorrem na parte superior do talude ou vertente e à presença de água (Bell, 1993).

5.2.3 ROTURA POR “TOPPLING”/BASCULAMENTO

A ruptura por “toppling” envolve a rotação de blocos individuais ou então um conjunto de blocos de rocha sobre um ponto fixo, tombando sobre a face livre do talude (Figura 5.3) e a estabilidade dos mesmos não está condicionada pela sua resistência ao deslizamento (Vallejo, 2002).



Figura 5.3: Ruptura por *toppling* (Fonte: landslides.usgs.gov)

As condições mais favoráveis para que ocorra esse tipo de ruptura seriam quando dois planos de descontinuidades, bem definidas, se entrecruzam, uma delas mergulhando em altos ângulos (contra a face livre do talude) e a outra mergulhando no mesmo sentido do talude, porém em baixos ângulos (Hoek, et al., 1981).

Para que ocorra o tombamento de blocos, as seguintes condições devem ser observadas:

- As direcções da face do talude e das descontinuidades devem ser subparalelas ($\pm 20^\circ$).

- Ocorrência de duas famílias de descontinuidades que se interceptam inclinadas, uma a favor e a outra contra a inclinação do talude.
- A família de descontinuidade que mergulha contra o talude deverá ser inclinada em ângulos maiores que $90-\varphi$, enquanto a família que mergulha a favor, deverá ter inclinações menores que o ângulo de atrito interno (φ), segundo Hoek e Bray (1981).

5.2.4 MOVIMENTOS COMPLEXOS E COMPOSTOS

Englobam situações que combinam mais de um tipo de movimentos relacionados com a instabilidade. Nos primeiros conseguem-se distinguir diferentes tipos de movimentos, em momentos temporais sucessivos, enquanto, nos segundos verifica-se a existência de dois mecanismos simultâneos, em partes diferenciadas do material deslocado.

A diferenciação entre um movimento complexo e um movimento composto é muitas vezes difícil de estabelecer, designadamente quando o estudo de campo é efectuado posteriormente ao período de desenvolvimento da instabilidade. Pode considerar-se como movimentos complexos a queda de blocos rochosos seguida de avalanche de detritos, bem como o deslizamento de material rochoso que origina a queda de blocos. Uma das situações mais características de movimentos compostos corresponde ao basculamento de material rochoso e deslizamento rotacional.

5.3 MEDIDAS DE ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES

A natureza está em mudança constante permitindo que as rochas sofram meteorização, isto é, se alterem física e quimicamente. Os solos e rochas sofrem igualmente erosão devido à acção humana e aos agentes de meteorização. Os processos que levam à destruição são mais usuais que os processos de construção.

Quando uma encosta sofre ruptura ou corre risco de estabilidade, devem adoptar-se medidas de estabilidade. O estudo dos maciços rochosos potencialmente instáveis é uma tarefa difícil que exige trabalho de campo rigoroso, uma análise detalhada e bom senso de engenharia, a fim de compreender a importância relativa dos factores de instabilidade que actuam sobre a encosta.

Os principais objectivos de qualquer estabilização de um maciço rochoso é minimizarem o volume de material escavado, proporcionado com uma escavação económica e segura e adequado com a função pretendida. De igual modo, e por diferentes razões, como construtivas, ambientais, económicas, pode ser necessário mudar o ângulo de inclinação do talude, implementando medidas de estabilização (Vallejo, 2002).

A fim de adoptar estas medidas é necessário conhecer:

- As propriedades e o comportamento geomecânico do terreno.
- O mecanismo e topologia das roturas, incluindo a velocidade e direcção do movimento e a geometria de rotura.
- Os factores geológicos, hidrogeológicos e outros factores que influenciam a instabilidade, e que determinam as causas da mesma e portanto as medidas mais adequadas à estabilização, sendo importante os dados referentes à situação de níveis freáticos, pressão de água e permeabilidade dos materiais.
- Os meios económicos e materiais disponíveis.
- A urgência na intervenção.
- A magnitude e dimensão da instabilidade.

Devem ser realizados estudos geológicos e hidrogeológicos e efectuar as investigações e reconhecimentos *in situ* ao detalhe que complementados com ensaios de laboratório, permitirá a definição das propriedades e parâmetros geotécnicos dos materiais. É também necessário, o conhecimento dos factores ambientais e os relacionados com a acção humana (Vallejo, 2002).

As medidas de estabilização dos taludes podem ser agrupadas de acordo com a classificação dos valores do SMR. Os valores do SMR são avaliados em cinco classes de estabilidade, desde a classe I que corresponde a um talude totalmente estável, à classe V que está relacionada com um talude totalmente instável (Tabela 4.8: Classificação da estabilidade (adaptado de Romana, (1996))).

Para minimizar ou evitar os danos que podem provocar a instabilidade de taludes podem adoptar-se medidas de estabilização (Tabela 4.9: Valor SMR para diferentes tipos de rotura e respectivos métodos de suporte)).

5.3.1 MODIFICAÇÃO DA GEOMETRIA DO TALUDE;

A modificação da geometria de um talude é um dos métodos mais eficientes no tratamento de deslizamentos de grandes massas de uma encosta. É utilizado nos maciços rochosos quando a instabilidade é devido à ruptura planar. Com a modificação da geometria verifica-se uma redistribuição das forças que actuam num talude, obtendo-se uma configuração mais estável. Nos estudos relacionados com a modificação de geometria considera-se a orientação do talude como uma característica fundamental (Hudson, 1993).

A modificação da geometria do talude consiste nos seguintes processos:

- Remoção do material do talude que provoca a instabilidade (com possível substituição por outro tipo de material);
- Adição de material para manter a estabilidade (contrapeso nas bermas ou enchimento);
- Redução da inclinação do talude.
- Construção de bancadas no sentido de diminuir o pendor do talude.

A remoção do material da cabeceira do talude elimina o peso nessa zona, reduzindo as forças desestabilizadoras. Nem sempre a remoção do material ou a mudança de ângulo são possíveis, devido aos grandes volumes que por vezes é necessário mover. É necessário arranjar uma solução para o material escavado, de modo a evitar riscos ambientais. As expropriações na zona da cabeceira do talude e a presença de instalações também podem condicionar esta solução.

A alteração da geometria consiste na construção de bancadas. A construção de bancadas aumenta as tensões normais sobre a superfície de ruptura, melhorando a estabilidade e é efectuada pela adição de material como contrapeso nas bermas, ainda que esta solução implique ocupar maior espaço na base do talude, de onde o espaço ocupado geralmente é escasso.

É recomendado que o material aplicado como contrapeso nas bermas seja um material drenante ou então construir um sistema de drenagem adequado, caso contrário o seu efeito estabilizador pode ser condicionado pela acumulação de água

na zona da berma. Esta medida pode ser combinada com escavações na cabeceira (Vallejo, 2002).

Se o material na berma do talude é resistente e a instabilidade não é profunda, pode recorrer-se à construção de um muro, com um espaço entre a parede e o terreno a fim de suportar um peso extra nesta área, num eventual desmoronamento. Este preenchimento pode proteger o talude natural de acções ambientais.

5.3.2 SISTEMAS DE DRENAGEM

Os sistemas de drenagem têm como finalidade eliminar a presença de água no talude, condicionando as pressões intersticiais que actuam como factor desestabilizador nas fendas traccionadas (Vallejo, 2002). A drenagem é normalmente, entre todos, o método mais económico e vantajoso. A pressão da água é directamente proporcional ao quadrado da profundidade da fissura, tornando-se uma força desestabilizadora perigosa.

Para um comportamento satisfatório de uma estrutura de contenção, é fundamental a utilização de sistemas eficientes de drenagem. Os sistemas de drenagem podem ser superficiais ou internos. Em geral, os projectos de drenagem combinam com dispositivos de protecção superficial do talude. A drenagem possibilita a redução das pressões neutras, permitindo melhorar as características do maciço rochoso ou terroso que constitui um talude. Um aumento das pressões neutras provoca uma diminuição da resistência e da capacidade de suporte. Para além da definição do valor absoluto do teor de água, deve atender-se às suas variações, pois determinadas estruturas de estabilização de taludes, podem não estar dimensionadas para essas variações.

A drenagem pode ser superficial, através de valas de drenagem e tubulações, ou então profunda, utilizando drenagem sub-horizontal, galerias ou túneis. Os elementos de drenagem podem ainda ser específicos, como poços ou então contínua como as trincheiras.

5.3.3 REFORÇO DA RESISTÊNCIA DO TALUDE;

O reforço interno da resistência do talude tem como objectivo, aumentar a resistência ao corte através dos seguintes processos:

- Colocação de ancoragens e pregagens, elementos que aumentam as forças tangenciais de atrito nas superfícies de fracturas.
- Introdução de elementos que melhoram a resistência do terreno às superfícies de rotura, nomeadamente colocação de estacas e de microestacas;

Não é rigorosamente definida a distinção entre pregagens e ancoragens, embora sejam, em geral, significativamente diferentes a capacidade de carga e comprimento de umas e outras (Mascarenhas, 2006).

5.3.3.1 Ancoragens

As ancoragens correspondem a elementos estruturais formados por cabos ou barras de aço que são ancoradas em áreas estáveis do talude e trabalham em tensão fornecendo uma força contrária ao movimento e um aumento das tensões normais na superfície de fractura promovendo a mobilização e a resistência ao corte do terreno.

As ancoragens são constituídas por cabos ou varões de aço de resistência elevada, possuem comprimentos entre 15 e 40 metros podendo ter uma capacidade de carga entre 60 e 120 ton/ancoragem. Fica, em geral, envolvida em calda de cimento ou noutro agente fixador; esta armadura deve ser protegida da corrosão tanto mais quanto maior for a hostilidade do meio onde se situar.

De modo geral apresentam três zonas distintas (Vallejo, 2002):

- Cabeça – tem como finalidade suportar as cargas e corresponde à extremidade que fica fora do terreno. Podem unir-se na superfície com vigas de betão de forma a distribuir as forças estabilizadoras mais uniformemente no talude.
- Zona de selagem (bolbo de selagem) – constitui o corpo de amarração da ancoragem ao terreno. Normalmente o bolbo de selagem é em cimento, argamassa ou resina e transmite ao maciço a carga de tracção.
- Fuste ou trecho livre – é constituído por um varão estriado de alta resistência, ou por vários fios de aço, também de resistência elevada. Esta parte transmite as cargas de tracção entre as extremidades.

As ancoragens em taludes rochosos são constituídas por varões de aço que são introduzidos em furos previamente executados e são geralmente utilizadas para

impedir deslizamentos planares ou em cunha. O furo tem diâmetro consoante a capacidade de carga pretendida para ancoragem e o tipo de terreno. Normalmente são utilizadas em maciços rochosos fracturados, devido a ser uma medida muito efectiva na estabilização deste e de eventuais blocos deslizantes. O seu comportamento deve ser monitorizado após a sua instalação.

Dependendo da sua funcionalidade, as ancoragens podem ser classificadas como passivas (de baixa capacidade, a ancoragem começa a trabalhar para produzir o movimento do bloco), activas (a ancoragem é esticada após a instalação para a sua carga admissível) ou mistas (a ancoragem é esticada com uma carga inferior à sua carga admissível) (Vallejo, 2002).

5.3.3.2 Pregagens

As pregagens são varões de aço que se introduz no talude, podendo se classificar como ancoragens passivas de baixa capacidade. Podem atingir comprimentos entre os 3 e os 6 m e o diâmetro variando entre os 25 e os 40 mm. São colocados em furos previamente feitos no maciço e preenchidos com resina ou betão. A sua carga admissível oscila entre os 5 e 15 ton/pregagem (Vallejo, 2002).

Pode ser usado para suportes temporários ou permanentes e em vários tipos de rocha, duras ou não, e seus vários graus de alteração. As pregagens fixam os blocos de rocha que podem estar instáveis. Quando os blocos são de grandes dimensões, a sua fixação deve ser mediante ancoragens. A utilização com quaisquer condições de água na rocha, mesmo de grande pressão, é uma das suas vantagens

5.3.3.3 Construção de Elementos de Contenção;

Os muros são estruturas de contenção, construídos na parte inferior dos taludes e constituem elementos resistentes, de contenção ou de sustentação, reforçando a zona da berma do talude, além de evitar a degradação desta zona crítica frente à instabilidade superficial. Os muros de contenção apresentam como inconveniente a escavação junto da berma do talude, ampliando a instabilidade deste.

A utilização de muros de contenção está muitas vezes relacionada com a diminuição da extensão dos taludes. São construídos afastados do talude e após a construção, esse afastamento é preenchido de modo a proteger contra a erosão e proporcionar uma estabilização para o pé do talude.

Existem diferentes tipos de muros que apresentam uma série de características que os tornam adequados para os diferentes casos de estabilização, sejam flexíveis ou rígidos, conforme se pretende querer estabilizar ou fornecer uma força adicional. Os tipos de muros mais frequentes para os taludes de escavação são:

- Muros de alvenaria (pedra arrumada e pedra argamassada)
- Muros de betão armado
- Muros ancorados
- Gabiões

Se as condições de fundação são de boa qualidade, podem executar-se muros rígidos (de pedra ou de betão), se a fundação apresenta tendência para deformar, é recomendável a construção de muros flexíveis (tais como os gabiões).

a. Muros de pedra arrumada

Os muros em pedra arrumada correspondem a um tipo simples de suporte e são constituídos pelo arranjo manual de pedras, a sua resistência resulta do imbricamento, enrocamento, dos blocos de pedras. Os blocos devem apresentar dimensões regulares e a base do muro deve ter uma largura mínima de 0,5 a 1,0 m (Ortigão, et al., 1999). Este tipo de obra não necessita de dispositivos de drenagem, devido à própria estrutura do muro ser drenante.

b. Muros de betão ciclópico

Os muros de betão ciclópico são muros de gravidade, cuja capacidade de deformação é reduzida. Para o preenchimento dos vazios existentes entre os blocos de pedra, procede-se à utilização de uma argamassa de cimento e areia. Estes muros requerem boas condições de fundação e uma drenagem eficiente, através da utilização de drenos, pois a argamassa confere uma maior rigidez ao muro e anula a capacidade drenante.

c. Muros de gabiões

Os muros de gabiões são muros flexíveis, constituídos por caixas ou contentores de formas geralmente paralelepípedicas, formadas por redes de malha hexagonal que são constituídas por arames de aço galvanizado ou revestidos com PVC (Coelho, 1996), as caixas são preenchidas com pedras arrumadas à mão, essas pedras devem ter uma granulometria uniforme e um diâmetro entre uma a duas vezes a dimensão da malha, para além de se apresentarem não alteradas (Ortigão, et al., 1999). Os gabiões funcionam como um muro de gravidade e as suas principais vantagens são a

capacidade de drenagem e uma grande flexibilidade; permitem deformações elevadas sem entrarem em rotura, são de construção relativamente rápida e têm uma vasta utilização.

d. Muros de betão armado

Os muros de betão armado são construídos *in situ*, em valas escavadas, com uma acção estabilizadora similar às microestacas, com a diferença de que constitui um elemento contínuo. Correspondem a estruturas de secção em L que podem apresentar contrafortes. Uma das suas vantagens está relacionada com a diminuição do volume da estrutura de suporte, no entanto o muro de betão armado é, de modo geral, mais dispendioso do que as outras estruturas de suporte.

Os muros de betão armado devem ser projectados de acordo com as tensões de flexão e os impulsos a que vão estar sujeitos. A construção dos muros de betão implica a impermeabilização do tardo e a utilização de drenos para diminuição da pressão da água. Podem ser reforçados com ancoragens, a fim de melhorar a resistência do maciço e impedir o deslizamento da estrutura.

A água é o principal agente desestabilizador num talude. A drenagem é um aspecto importante que deve ser considerado na construção de muros, devido a poder saturar o terreno, originando elevadas pressões intersticiais e impulsos sobre os muros.

5.3.4 MEDIDAS DE PROTECÇÃO SUPERFICIAL

Estas medidas tem como objectivo eliminar os problemas de quedas de rochas, aumentar a segurança no talude frente a rupturas superficiais, diminuir a erosão e a meteorização na superfície do talude, assim como evitar o escoamento superficial.

Nas medidas de protecção superficial destacam-se a utilização do betão projectado, as valas de captura, a rede metálica de protecção, construção de muros, assim como mantas de revestimento geotêxtil (Vallejo, 2002).

5.3.4.1 Betão projectado

O betão projectado pode ser aplicado em maciços rochosos são ou pouco alterados, que no entanto se apresentam fracturados, de modo a evitar situações de desmoronamentos. Pode ser efectuado rapidamente, tornando-se num processo rentável. O betão projectado é aplicado através de equipamentos que utilizam ar

comprimido e as espessuras variam entre 5 a 10 cm. Normalmente são aplicadas várias camadas de betão projectado sobre o talude.

A projecção do betão consiste na limpeza previamente da superfície com ar comprimido. Pode ser perigoso injectar betão em zonas com drenagem natural, de modo a evitar as pressões internas de água, por isso, é recomendado a instalação de drenos. Deve-se executar uma drenagem interna quando não se possa executar aberturas ou tubos para a saída de água. O negativo efeito estético do betão projectado pode ser minimizado através da utilização de pigmentos claros na camada final (Hudson, 1993).

Com o tempo a camada de betão deteriora, formando fissuras e permitindo a queda de blocos. Como solução, em algumas situações de rochas mais fracturadas pode utilizar-se conjuntamente com o betão projectado, malhas metálicas e pregagens.

5.3.4.2 Rede metálica de protecção

A rede metálica de protecção é colocada em zonas do talude que se encontram muito fracturadas, de modo a evitar a queda de blocos rochosos, designadamente em vias de comunicação. A malha da rede metálica pode ser de dupla ou tripla torção. Existem situações em que a rede metálica deve ser reforçada com cabos metálicos que são ancorados ou pregados ao maciço rochoso e esticada (Vallejo, 2002).

A rede metálica de protecção deve ser fixada somente na parte superior do talude ou no topo de uma bancada do talude, evitando deste modo que o material rochoso instabilizado se acumule e origine roturas na rede metálica. Esta medida de protecção é útil para situação de ruptura de falhas em cunha.

5.3.4.3 Colocação de cobertura vegetal

Quando a influência da cobertura vegetal é considerada na avaliação da estabilidade de encostas, alguns parâmetros podem ser acrescidos no caso de haver cobertura vegetal de porte considerado e ventos soprando no sentido da inclinação da vertente. A cobertura vegetal é importante para a estabilização do talude de forma natural, mesmo com um grande declive. A retirada desta provocaria a instabilidade do talude (Tabalipa, et al., 2008).

Os maciços rochosos muito fracturados apresentam muitas vezes problemas de desprendimento de blocos devido às discontinuidades. Entre as acções de

estabilização dos blocos de rocha, verifica-se que os blocos que estão soltos devem ser removidos a fim de não prejudicar os outros blocos na estabilização. Podem ser removidos através de demolição controlada, como fragmentação através do martelo pneumático ou então betonando as fissuras, de modo a comportarem-se como um elemento só (Vallejo, 2002).

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os parâmetros de resistência medidos requerem uma cuidadosa avaliação e análise dos dados geológicos. Deve ser considerado o modo mais provável de ruptura, o custo dos testes, e a consequência de um suposto derrubamento. Os custos dos métodos de estabilização devem ser relacionados com o custo de implementação, a fim de determinar os métodos ideais de estabilização.

Assim, evidenciou-se que os mapas de índices de segurança tornaram-se ferramentas indispensáveis para o planeamento territorial, assim como na amenização das consequências geradas pelos escorregamentos. São de fundamental importância pois permitem elaborar medidas de prevenção e mitigação dos riscos, direccionando as políticas públicas de uso e ocupação do solo.

Os sistemas de protecção de talude têm como função reduzir a infiltração e a erosão, decorrentes da precipitação sobre o talude. As alternativas de protecção superficial podem ser classificadas em dois grupos: protecção com vegetação e protecção com impermeabilização. Não existe uma regra para a concepção de projectos desta natureza, entretanto, deve-se sempre considerar a protecção vegetal como a primeira alternativa, em particular, para taludes não naturais. É respeitado o princípio básico de perturbar o menos possível o terreno e retirar o máximo proveito das suas características mecânicas naturais.

O estudo para melhorar a estabilidade global do maciço rochoso permite o planeamento detalhado e a implementação de um programa de estabilização de taludes. A estabilidade de maciços rochosos é condicionada pela presença de planos de descontinuidade e fissuras no interior deste. As características de resistência e deformação dependem da continuidade, espaçamento, orientação e das características mecânicas dos planos (Giani, 1992).

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo procura-se fazer a análise dos resultados obtidos e uma comparação face a outros trabalhos realizados, sobre amostras de materiais semelhantes.

6.1 LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

A opção escolhida foi pelos afloramentos de mais fácil acesso. Os taludes em estudo, Figura 6.1, o da Rua Dr. João Serra Velez Caroço, usualmente chamada de rua da Achada e o da Rua D. Ernesto Sena de Oliveira, habitualmente conhecida como a rua da Peugeot, pertencem a um maciço constituído por escoadas basálticas e apresentam na parte superior depósitos de cobertura onde se verifica presença de vegetação e edifícios de moradias (Figura 6.2A). É de salientar que o talude da Peugeot serve de apoio a um pilar do teleférico que faz ligação entre o Monte e o centro do Funchal, Figura 6.2B.

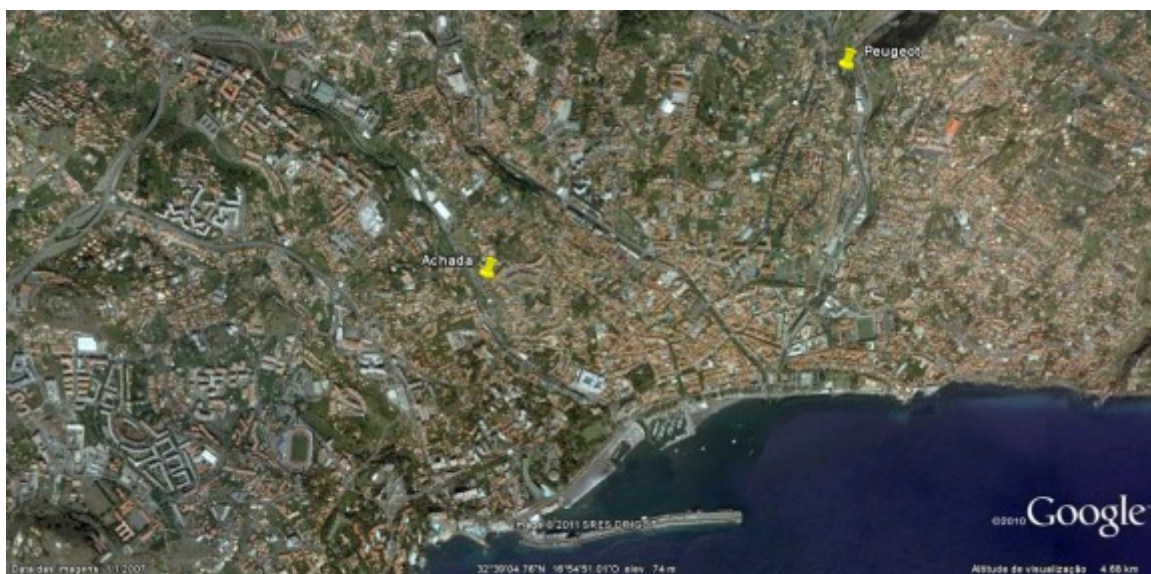


Figura 6.1: Localização dos taludes em estudo (Fonte: Google Earth)

Estes taludes pertencem ao complexo vulcânico $\beta 2$ e são compostos por escoadas lávicas recentes, que ocupam o interior dos vales.

Ambos os taludes são em geral sãos, embora localmente possam apresentar sinais de meteorização. Estes taludes pertencem a uma escoada basáltica de origem vulcânica efusiva. O talude da Peugeot apresenta um índice de meteorização

superior devido apresentar uma superfície de oxidação, consequência da presença de água (Figura 6.3A), tanto por humidade em fendas como por gotejamento. O talude da Achada apresenta alteração apenas nas imediações das descontinuidades, sendo que a rocha matriz encontra-se alterada mas não é quebradiça. Ambos os taludes encontram-se nos 150 m de altitude.



Figura 6.2: Vista geral sobre os taludes (A) Achada e (B) Peugeot

O talude da Achada é constituído por disjunção colunar e em laje, Figura 6.3B. A escoada basáltica do talude da Peugeot apresenta, também, disjunção colunar e em laje e rochas bastante alteradas e fracturadas apresentando, por vezes, disjunção esferoidal.



Figura 6.3: (A) maciço do talude da Peugeot e (B) maciço do talude da Achada

6.2 CARACTERIZAÇÃO DOS TALUDES ESTUDADOS (DESCRIÇÃO GEOLÓGICA)

O primeiro passo no estudo das descontinuidades consiste na análise da orientação e identificação de descontinuidades singulares ou famílias de descontinuidades, que podem apresentar blocos de rochas potencialmente instáveis.

As descontinuidades podem ser agrupadas por famílias, em que cada família é um conjunto de descontinuidades com a mesma orientação e gênese.

Na escoada basáltica da Achada, observaram-se várias famílias de descontinuidades, sendo três as predominantes. Cada troço acolhe uma família de descontinuidades. O talude da Achada apresenta um declive entre 75° e 89°, uma orientação de N 10° W; 90° e uma altura de cerca de 15 m.


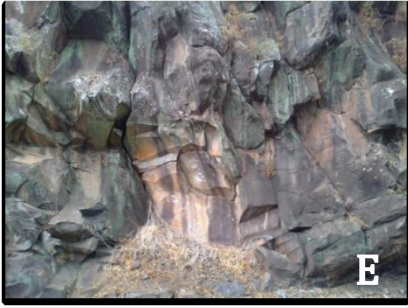
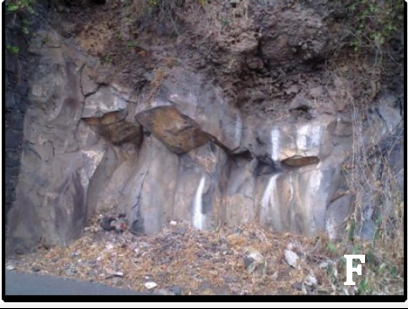

Tabela 6.1: Descrição do talude da Achada

Troço	Orientação	Dimensões	Observações
	N 55° W; 45° SE	12 m de comprimento por aproximadamente 15 m de altura	Depósito de cobertura no topo do talude de cerca de 3 m de espessura
	N 25° W; 88° SE	15 m de comprimento e aproximadamente 14 m de altura	Depósito de cobertura, que se localiza no topo do talude, aproximadamente 2 m de espessura. Serve de apoio a algumas habitações
	N 10° E; 35° SE	17 m de comprimento e tem uma altura de cerca de 12 m	Aproximadamente 1 m de espessura de depósito de cobertura

No estudo efectuado procedeu-se à divisão do talude da Achada em três troços distintos (A, B e C) (Tabela 6.1).

Por sua vez, o talude da Peugeot foi dividido em quatro troços distintos (D, E, F e G) (Tabela 6.2).

Tabela 6.2: Descrição do talude da Peugeot

Troço	Orientação	Dimensões	Observações
 D	N 40° E; 75° SE	20 m de comprimento por aproximadamente 15 m de altura	Depósito de cobertura no topo do talude com cerca de 3 metros de espessura. Este troço serve de apoio a um pilar do teleférico
 E	N 40° W; 52° SE	20 m de comprimento por aproximadamente 15 m de altura	Depósito de cobertura, que se localiza do topo do talude com aproximadamente 2 m de espessura
 F	N 30° E; 62° SE	7 m de comprimento e tem uma altura de cerca de 17 m	Aproximadamente 1 m de espessura de depósito de cobertura
 G	N 10° W; 85° SW (apresenta declive negativo)	6 m de comprimento e tem uma altura de cerca de 17 m	1 m de espessura de depósito de cobertura

Com atenção à sua orientação e génese, este talude apresenta quatro famílias de descontinuidades. Os troços D e F apresentam orientação parecida, mas diferem na génese da rocha, nomeadamente no espaçamento e comprimento das

descontinuidades e ainda na rugosidade da sua superfície. Este talude tem a orientação de N 20° W; 84° SE, um declive centrado entre 80 a 89° e uma altura máxima de 17 m.

Após o levantamento geológico-estrutural de campo, procedeu-se à aplicação das classificações geomecânicas RMR e SMR para os referidos taludes.

No talude da Achada, observaram-se nos três troços do talude numerosas fracturas de extensões variadas, entre os 3 e os 10 metros. Estas fracturas atingem em algumas zonas uma abertura de 2 cm. O espaçamento entre elas varia entre pequena, cerca de 20 cm, a grande, até 2 m aproximadamente. Formam blocos de tamanho médio a grandes (entre 1 a 3 juntas/m³).

Ao longo do talude da Peugeot, observou-se também numerosas fracturas de extensões variadas, entre as mais pequenas, com extensão menor que 1 m às de tamanho médio entre os 3 e os 10 metros. Todas as aberturas são inferiores a 1 cm. O espaçamento entre as descontinuidades varia entre média, com valores entre os 20 e os 60 cm, a grandes, entre os 60 cm e os 2 m aproximadamente. Estas características formam blocos de tamanhos muito grandes, aproximadamente 1 junta/m³, a tamanho médio, até 10 juntas/m³.

Dentro de cada troço procedeu-se à definição de zonas tendo em consideração a resistência do material rochoso. A partir das determinações, em que se utilizou o martelo de Schmidt de tipo N, considerou-se que o material rochoso menos alterado do talude da Achada e da Peugeot é definido como de resistência alta (entre 100 a 250 MPa) de acordo com a classificação RMR de Bieniawski. No entanto é de assinalar a existência de variações do grau de cimentação e do estado de alteração do material rochoso, que contribuem para que pontualmente a resistência possa ser considerada como média a média-alta. Estes taludes têm uma superfície entre ligeira a moderadamente meteorizada. Comum também, têm as superfícies de descontinuidades, que se apresentam desde rugosas a ligeiramente rugosas.

No talude da Achada não se observou percolação de água nas superfícies de descontinuidades, estando a superfície seca, enquanto no talude da Peugeot, encontrou-se zonas que se encontravam entre ligeiramente húmidas a húmidas.

Os locais de estudo correspondem a taludes naturais, que apresentam um grau de meteorização médio.

6.3 CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS

6.3.1 RESISTÊNCIA DO MATERIAL ROCHOSO

Na determinação da resistência à compressão uniaxial do material rochoso intacto, que é um dos parâmetros da classificação RMR, procedeu-se à utilização dos valores do ressalto, R, que foram definidos através do martelo de Schmidt (tipo N). O ensaio foi realizado de acordo com o método sugerido pelo ISRM «*Suggested method for determination of the Schmidt rebound hardness*».

Na escolha das superfícies de ensaio, teve-se particular cuidado em escolher as superfícies que fossem lisas e planas, sob a área abrangida pelo êmbolo, e fossem também isentas de fissuras, ou de qualquer descontinuidade localizada do maciço rochoso. As superfícies de ensaio eram, normalmente, “*fresh*”.

Como sugere a ISRM, realizaram-se dez testes individuais, em locais de impacto alternadamente distintos, tanto nos taludes da Achada como da Peugeot. Em cada talude, Peugeot e Achada, foram realizados oito ensaios, cada um, numa área de ensaio de aproximadamente a uma palma da mão. Os valores foram registados de acordo com a orientação do disparo (o recuo é maior quando o disparo é ascendente). Encontra-se no Anexo I, os resultados obtidos do ressalto do esclerómetro nos taludes da Achada e da Peugeot.

Consideraram-se os valores dos pesos específicos do material rochoso, de acordo com resultados de ensaios laboratoriais de rochas ígneas (basalto compactado, que é o caso da amostra em estudo). Os valores obtidos são normalmente superiores a 28 kN/m³ (Perneta, 2010).

TALUDE DA ACHADA

Na zona de menor resistência do primeiro troço, o valor médio do ressalto, R, foi igual a 54,8 (troço C) e através do ábaco de Deere & Miller (1966) (Figura 4.1) podemos definir o valor de resistência à compressão do material rochoso como de 220 MPa. Este resultado permite considerar o valor ponderal do parâmetro de resistência do material rochoso na classificação RMR como igual a 12, pois enquadra-se no intervalo 100-250 MPa (R5).

Na zona de maior resistência, obteve-se um valor médio de R de 59,4 (troço A) que corresponde, de acordo com o ábaco de Deere & Miller (1966), a uma resistência à compressão de cerca de 265 MPa. Como este valor ultrapassa o limite das classes de 250 MPa (R6), o parâmetro da resistência do material rochoso da classificação do RMR assume o valor ponderal de 15.

TALUDE DA PEUGEOT

No talude da Peugeot, obteve-se valores superiores que os da Achada. Na zona de menor resistência, o valor médio do ressalto, R, foi igual a 57,5 (troço D). De igual forma, através do ábaco de Deere & Miller (1966) (Figura 4.1) pode-se definir o valor de resistência à compressão do material rochoso como de 245 MPa. Este resultado permite considerar o valor ponderal do parâmetro de resistência do material rochoso na classificação RMR como igual a 12, pois enquadra-se no intervalo 100-250 MPa (R5).

Na zona de maior resistência obteve-se um valor médio de R de 67,2 (troço E) o que corresponde, de acordo com o ábaco de Deere & Miller (1966), a uma resistência à compressão de cerca de 300 MPa. O valor obtido é superior ao patamar dos 250 kN (R6), logo obteve-se um parâmetro da resistência do material rochoso de valor 15.

6.3.2 DETERMINAÇÃO DO VALOR DO RQD E DO ESPAÇAMENTO

Procedeu-se à determinação do valor do RQD a partir da expressão de Palmstron (1982) (Equação 4.2). RQD representa o grau de fracturamento do maciço rochoso.

Para a definição do RQD devem definir-se os valores de J_v através da Equação 4.1. Estes valores implicam a determinação do espaçamento das famílias das descontinuidades presentes nos diferentes troços do talude.

TALUDE DA ACHADA

De acordo com o levantamento efectuado no campo, para o primeiro local de estudo, determinaram-se valores de espaçamento compreendidos entre 200 e 600 mm (F3 - medianamente afastadas) no troço A. No troço B o valor de espaçamento foi entre os 60 e 200 mm (F4 - próximas) e para o troço C entre os 2 m e os 600 mm (F2 - afastadas), conforme a classificação da ISRM (1981), (Tabela 4.1: Classificações

geomecânica RMR (adaptação de Bieniawski (1989))). Através destes espaçamentos, obteve-se um valor de J_v de 11,0 segundo a Equação 4.1.

De acordo com as determinações efectuadas, o valor do RQD é de cerca de 79 %, o que na classificação RMR de Bieniawski (1989, pertence ao intervalo 76 % – 90 % (qualidade do maciço rochoso boa), pelo que o seu peso é 17.

Os espaçamentos das descontinuidades, como referido anteriormente, possuem espaçamentos compreendidos entre os 60 mm e os 2 m. Os valores ponderais encontram-se na Tabela 6.3:

Tabela 6.3: Espaçamento das descontinuidades do talude da Achada

Troço	A	B	C
Espaçamento das descontinuidades (m)	0,2 - 0,6	0,06 - 0,2	0,6 - 2
Valor ponderal	5	8	15

As espessuras das camadas do maciço rochoso no talude da Achada focam-se entre os 0,6 e os 2 metros (L2).

TALUDE DA PEUGEOT

De acordo com o levantamento efectuado no campo, para o primeiro e último troço (D e G), determinaram-se valores de espaçamento compreendidos entre 60 e 200 mm, o que permite a sua classificação como próximas (F4), conforme a classificação da ISRM (1981), (Tabela 4.1: Classificações geomecânica RMR (adaptação de Bieniawski (1989))). Para o segundo e terceiro troço (E e F), obteve-se um espaçamento entre 200 e 600 mm (F3 - medianamente afastadas). Através destes espaçamentos, alcançou-se um valor de J_v de 6,5 obtido através da Equação 4.1.

Baseado nas determinações efectuadas, o valor do RQD é de cerca de 93,4 %, o que na classificação RMR de Bieniawski (1989) pertence ao intervalo 90 – 100 % (qualidade do maciço rochoso excelente), pelo que o seu peso é 20.

Os espaçamentos das descontinuidades, como referido anteriormente, possuem espaçamentos compreendidos entre os 600 mm e os 2 m e entre os 20 e os 60 cm. Os valores ponderais encontram-se na Tabela 6.4:

Tabela 6.4: Espaçamento das descontinuidades do talude da Peugeot

Troço	D	E	F	G
Espaçamento das descontinuidades (m)	0,6 - 2	0,2 - 0,6	0,2 - 0,6	0,6 - 2
Valor ponderal	15	5	5	15

Assim como no talude da Achada, as espessuras das camadas do maciço rochoso no talude da Peugeot focam-se entre os 0,6 e os 2 metros (L2).

6.3.3 CARACTERÍSTICAS DAS DESCONTINUIDADES

No levantamento efectuado no campo procedeu-se à definição de características como a continuidade, abertura, rugosidade, material de preenchimento e estado de alteração de cada família de descontinuidades.

TALUDE DA ACHADA

A persistência mais comum das descontinuidades é entre 3 a 10 metros, pelo que pode ser classificada de continuidade média. Apresenta um valor ponderal de 2.

As descontinuidades apresentam uma abertura variável. No troço A, as descontinuidades são muito fechadas, enquanto no troço B e C são parcialmente abertas a abertas (entre 0,5 a 2,5) de acordo com a classificação da abertura das descontinuidades ISRM (1981). As aberturas possuem valor ponderal entre 1 a 5.

Quanto à rugosidade, determinou-se que as superfícies das descontinuidades são desde lisas, com o valor ponderal correspondente de 0, de acordo com a classificação de Bieniawski (1989), a ligeiramente rugosas, com um valor ponderal de 3.

O material de preenchimento está compreendido entre duro e com espessura <5 mm, com maior valor ponderal de 4, a brando > 5 mm, com valor ponderal 0.

O grau de alteração das superfícies das descontinuidades foi classificado como ligeiramente a moderadamente alterado, o que corresponde ao peso 3 e 5 respectivamente, da classificação de Bieniawski (1989). Estas características encontram-se descritas na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Caracterização do maciço rochoso do talude da Achada

Troço	A	B	C
Comprimento das descontinuidades (m)	3 - 10	3 - 10	3 - 10
Valor ponderal	2	2	2
Abertura (mm)	<0,1	0,1 - 1	1 - 5
Valor ponderal	5	4	1
Rugosidade (m)	Lisa	Ondulada	Ligeiramente rugosa
Valor ponderal	0	1	3
Preenchimento (m)	Duro <5	Brando <5mm	Brando > 5mm
Valor ponderal	4	2	0
Meteorização (m)	Ligeiramente alterada	Moderadamente alterada	Ligeiramente alterada
Valor ponderal	5	3	5
Total	16	12	11

TALUDE DA PEUGEOT

Os valores de persistência mais comum das descontinuidades são entre 3 a 10 metros, pelo que pode ser classificada como de continuidade média, apresentando um valor ponderal de 2 (D e E). Existe ainda continuidades inferiores a 1 m (troço F), apresentando um valor ponderal de 6 e ainda continuidades entre o 1 e 3 m (troço G) apresentando um valor de 4.

As descontinuidades apresentam uma abertura pouco variável. Nos quatro troços, as descontinuidades são fechadas a parcialmente abertas apresentando um valor ponderal de 4, de acordo com a classificação da abertura das descontinuidades da ISRM (1981).

As superfícies de descontinuidades, quanto à rugosidade, são desde onduladas com o valor ponderal correspondente 1, a ligeiramente rugosas, com valor ponderal de 3, de acordo com a classificação de Bieniawski (1989).

Em relação ao material de preenchimento este encontra-se inexistente, pelo que o seu maior valor ponderal é 6, a brando com espessura <5 mm obtendo um valor ponderal de 2 (troço G).

Tabela 6.6: Caracterização do maciço rochoso do talude da Peugeot

Troço	D	E	F	G
Comprimento das descontinuidades (m)	3 - 10	3 - 10	<1	1 - 3
Valor ponderal	2	2	6	4
Abertura (mm)	0,1 - 1	0,1 - 1	0,1 - 1	0,1 - 1
Valor ponderal	4	4	4	4
Rugosidade (m)	Ondulada	Ligeiramente rugosa	Ligeiramente rugosa	Ondulada
Valor ponderal	1	3	3	1
Preenchimento (m)	Nenhuma	Nenhuma	Nenhuma	Brando <5mm
Valor ponderal	6	6	6	2
Meteorização (m)	Ligeiramente alterada	Ligeiramente alterada	Ligeiramente alterada	Ligeiramente alterada
Valor ponderal	5	5	5	5
Total	18	20	24	16

O grau de alteração das superfícies das descontinuidades é comum e foi classificado como ligeiramente alterado, o que corresponde ao peso de 5, da classificação de Bieniawski (1989). Estas características encontram-se descritas na Tabela 6.6.

6.3.4 PRESENÇA DE ÁGUA

TALUDE DA ACHADA

Na totalidade dos afloramentos do maciço rochoso que constitui os três troços do talude não se verificaram situações de percolação de água, designadamente ao longo das superfícies de descontinuidades. No entanto é possível a ocorrência de superfícies de descontinuidade húmidas durante ou imediatamente após os períodos de maior precipitação. Tendo em atenção o levantamento efectuado, ainda

que estimado nas piores condições possíveis, apresenta-se seco ao longo dos troços, obtendo um valor ponderal de 15.

TALUDE DA PEUGEOT

Tendo em atenção o levantamento efectuado no referido talude, Tabela 6.7, registou-se que a quase totalidade das superfícies de descontinuidade das várias famílias, em termos de presença de água, foi classificada numa situação intermédia entre completamente secas a ligeiramente húmidas. Esta classificação foi estabelecida devido à presença constante de manchas de oxidação nas superfícies das descontinuidades, o que revela a existência de acção da água nessas mesmas superfícies.

Tabela 6.7: Condições de percolação do talude da Peugeot

Família	D	E	F	G
Condições de percolação	Seco	Seco	Ligeiramente húmido	Húmido
Valores ponderais	15	15	10	7

No troço D verificou-se a presença de gotejamento nas descontinuidades, por isso a zona foi caracterizada como húmida, obtendo um valor ponderal de 7.

6.4 APLICAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO RMR E SMR

6.4.1 CLASSIFICAÇÃO RMR

Para os diferentes troços do talude estudado procedeu-se à determinação dos valores do RMR, em que se consideram os valores dos cinco parâmetros distintos: resistência da rocha intacta, RQD, espaçamento das descontinuidades, condições das descontinuidades e percolação apresentados na Tabela 4.1.

TALUDE DA ACHADA

Na Tabela 6.8 apresentam-se os valores ponderais dos parâmetros do RMR e do seu somatório. Considerou-se o valor ponderal mínimo de resistência à compressão uniaxial da rocha intacta.

Tabela 6.8: Valores ponderais dos parâmetros de RMR para o talude da Achada

Parâmetros		Troços		
		A	B	C
1	Resistência da rocha intacta (min)	12,0	12,0	12,0
2	RQD	17	17	17
3	Espaçamento das descontinuidades	5	8	15
4	Condições das descontinuidades	16	12	11
5	Percolação	15	15	15
Total		65,0	64,0	70,0
Classificação		II Bom	II Bom	II Bom

Os valores do RMR indicam que o maciço rochoso no talude da Achada apresenta uma resistência que pode classificar-se como de qualidade boa, em qualquer troço.

TALUDE DA PEUGEOT

Na Tabela 6.9 apresentam-se os valores ponderais dos parâmetros do RMR e do seu somatório para o talude da Peugeot.

Tabela 6.9: Valores ponderais dos parâmetros de RMR para o talude da Peugeot

Parâmetros		Troços			
		D	E	F	G
1	Resistência da rocha intacta (min)	12,0	12,0	12,0	12,0
2	RQD	20	20	20	20
3	Espaçamento das descontinuidades	15	5	5	15
4	Condições das descontinuidades	18	20	24	16
5	Percolação	15	15	10	7
Total		80,0	72,0	71,0	70,0
Classificação		II Bom	II Bom	II Bom	II Bom

Os valores do RMR indicam que o maciço rochoso no talude da Peugeot apresenta uma resistência uniforme, que pode classificar-se como boa.

6.4.1.1 **Factor de correcção**

Após obtidos os cinco parâmetros de classificação RMR, efectua-se uma correcção da orientação das descontinuidades e obtém-se um valor numérico que condiciona o comportamento do maciço rochoso.

TALUDE DA ACHADA

Conforme as condições das águas subterrâneas e a inclinação das próprias descontinuidades, a direcção das descontinuidades variou entre favoráveis no troço A e C devido à inclinação das descontinuidades e ao maciço encontrar-se seco, a muito favoráveis no troço B, Tabela 6.10.

Tabela 6.10: Factores de correcção para o talude da Achada

Descontinuidades		Pendor	Tipo de situação	Valor ponderado	RMR corrigido	Classificação
Troço	A	45 SE	Favoráveis	-5	60,0	III Razoável
	B	88 SE	Muito Favoráveis	0	64,0	II Bom
	C	35 SE	Favoráveis	-5	65,0	II Bom

Após o factor de correcção, o talude da Achada revela ter uma resistência que pode classificar-se como razoável a boa.

TALUDE DA PEUGEOT

Conforme as condições das águas subterrâneas e a inclinação das próprias descontinuidades, a direcção das descontinuidades apresentou valores entre muito favorável (troço D) a favoráveis, no caso do troço E e F obtendo um valor ponderativo de 0 a -5 respectivamente. A família de descontinuidades G obteve uma classificação de razoável devido ao declive negativo das descontinuidades e da presença de água, sendo o valor ponderativo de -25 (Tabela 6.11).

Tabela 6.11: Factores de correcção para o talude da Peugeot

Descontinuidades		Pendor	Tipo de situação	Valor ponderado	RMR corrigido	Classificação
Troço	D	75 SE	Muito Favoráveis	0	80,0	II Bom
	E	52 SE	Favoráveis	-5	67,0	II Bom
	F	62 SE	Favoráveis	-5	66,0	II Bom
	G	85 SW	Razoável	-25	45,0	III Razoável

Na classificação do talude após esta correcção, os troços D, E e F mantiveram a sua classificação como boa, ao contrário do troço G que tem agora uma classificação de razoável.

6.4.2 CLASSIFICAÇÃO SMR

Estabeleceu-se a determinação dos valores de F1, F2 e F3 segundo a Tabela 4.7.

TALUDE DA ACHADA

O talude da Achada apresenta um pendor de 90° e uma direcção de pendor de 350° que podem ser representados por $(350^\circ, 90^\circ)$. Definiram-se os troços com secções que apresentam características geológicas uniformes, A, B e C.

O troço A tem como atitude $(305^\circ, 45^\circ)$. O valor de RMR definido para o primeiro troço, e depois de corrigido, de acordo com a família F foi de 60. O valor de F1 é igual a 0,15 para a rotura planar e para a rotura por “toppling”, o que traduz, de acordo com as direcções de pendor uma igual probabilidade baixa de rotura quer planar, quer por “toppling”.

A atitude do troço B é $(335^\circ; 88^\circ)$. O valor de F1 corresponde a 0,7 para a rotura planar e 0,15 para rotura por basculamento, o que significa que de acordo com as direcções de pendor uma possibilidade de ruptura planar mais provável de ocorrer que a ruptura por basculamento.

O troço C tem uma atitude de $(10^\circ, 35^\circ)$. O valor de F1 para a rotura planar e por basculamento é igual a 0,15, o que corresponde a uma probabilidade de rotura planar e por basculamento baixa.

Os valores de F1 para o talude da Achada encontram-se na Tabela 6.12.

Tabela 6.12: Caracterização factor F1 para o talude da Achada

Troço	$\alpha_j - \alpha_s$	Rotura Planar	$\alpha_j - \alpha_s - 180$	Rotura por Basculamento
A	45	0,15	225	0,15
B	15	0,7	195	0,15
C	340	0,15	520	0,15

Para o troço A, o valor de F2 é de 0,85 para a rotura planar e de 1 para a rotura por basculamento. No troço B, o valor de F2 é igual a 1 para as situações de rotura planar

e por basculamento. O valor de F2 é de 0,7 para a rotura planar e 1 para a ruptura por basculamento para o troço C. Os valores de F2 são apresentados na Tabela 6.13:

Tabela 6.13: Caracterização factor F2 para o talude da Achada

Troço	β_j	Rotura Planar	Rotura por Basculamento
A	45	0,85	1
B	88	1	1
C	35	0,7	1

No troço A, o F3 é -60 para a rotura planar e igual a -25 para a rotura por basculamento. Para o troço B, o valor ponderal de F3 é igual a -50 para a rotura planar e -25 para a rotura por basculamento e para o ultimo troço (C), o F3 corresponde a -60 para a rotura por basculamento e -25 para a planar. Os valores do SMR estão definidos na Tabela 6.14:

Tabela 6.14: Caracterização factor F3 para o talude da Achada

Troço	$\beta_j - \beta_s$	Rotura Planar	$\beta_j + \beta_s$	Rotura por Basculamento
A	-45	-60	135	-25
B	-2	-50	178	-25
C	-55	-60	125	-25

O valor de F4 é 15 por tratar-se de um talude natural.

Os valores de SMR após tratamento pela Equação 4.3 estão definidos na Tabela 6.15.

Tabela 6.15: SMR obtido para rotura por basculamento e planar para o talude da Achada

Troço	RMR	Rotura Planar	Rotura por Basculamento
		SMR	SMR
A	60	67,4	71,3
B	64	44	75,3
C	65	73,7	76,3

TALUDE DA PEUGEOT

O talude da Peugeot apresenta um pendor de 84° e uma direcção de pendor de 340° que podem ser representados por (340°, 84°). Definiram-se os troços com secções que apresentam características geológicas uniformes, D, E, F e G.

O troço D tem como atitude (40° , 75°). O valor de RMR definido para o 1º Troço, e depois de corrigido, de acordo com a família F foi de 79. O valor de F1 para a rotura planar é igual a 0,15 e por basculamento de 0,15, o que corresponde a uma probabilidade de rotura planar e por basculamento baixa.

Para o troço E, a atitude é (320° ; 52°). O valor de F1 corresponde a 0,7 para a rotura planar e 0,15 para rotura por basculamento, o que significa que, de acordo com as direcções de pendur uma possibilidade de ruptura planar mais provável que a ruptura por basculamento. O valor de RMR é de 66.

O troço F tem como atitude (30° , 62°). O valor de F1 para a rotura planar e por basculamento é igual a 0,15, o que corresponde a uma probabilidade de rotura e por basculamento baixa. Neste troço o valor de RMR, e depois de corrigido é de 65.

Tabela 6.16: Caracterização factor F1 para o talude da Peugeot

Troço	$\alpha_j - \alpha_s$	Rotura Planar	$\alpha_j - \alpha_s - 180$	Rotura por Basculamento
D	300	0,15	480	0,15
E	20	0,7	180	0,15
F	310	0,15	490	0,15
G	10	0,85	170	0,15

O último troço (G) tem como atitude (350° , 85°). O valor de RMR definido, e depois de corrigido, de acordo com a família F é de 44. O valor de F1 é igual a 0,85 para a rotura planar e 0,15 para a rotura por basculamento ou “toppling”, o que traduz, de acordo com as direcções de pendur, uma maior probabilidade de deslizamento por rotura planar. Tabela 6.16.

Tabela 6.17: Caracterização factor F3 para o talude da Peugeot

Troço	$\beta_j - \beta_s$	Rotura Planar	$\beta_j + \beta_s$	Rotura por Basculamento
D	-9	-50	159	-25
E	-32	-60	136	-25
F	-22	-60	146	-25
G	1	-6	169	-25

Como o pendur das descontinuidades, β_j , em qualquer troço, é superior que 45° , o valor de F2 é de 1, tanto para a rotura planar como para a rotura por basculamento.

Para o troço E e F, o F3 é -60 para a rotura planar e igual a -25 para a rotura por basculamento. O valor ponderal de F3 para o troço D é igual a -50 para a rotura planar e -25 para a rotura por basculamento. Por fim para o troço G, o valor ponderal de F3 é -6. Os valores do SMR estão definidos na Tabela 6.17:

Tabela 6.18: SMR obtido para rotura por basculamento e planar para o talude da Peugeot

Troço	RMR	Rotura Planar	Rotura por Basculamento
		SMR	SMR
D	80	87,5	91,3
E	67	40,0	78,3
F	66	72,0	77,3
G	45	55,9	36,2

O valor de F4 é 15 por tratar-se de um talude natural.

Os valores de SMR após tratamento pela Equação 4.3 estão definidos na Tabela 6.18.

6.5 MEDIDAS DE ESTABILIDADE

Os valores do SMR são avaliados em cinco classes de estabilidade, desde a classe I que corresponde a um talude totalmente estável à classe V que está relacionada com um talude totalmente instável. As medidas de estabilização dos taludes podem ser agrupadas de acordo com a classificação dos valores do SMR.

Do trabalho efectuado, obtive-se o índice SMR para cada um dos taludes estudados.

TALUDE DA ACHADA

O menor valor do índice SMR que foi encontrado para o primeiro troço do talude foi de 67,4, para o 2º troço o valor mais baixo é de 44 e para o terceiro troço o valor do SMR considerado mais baixo foi de 73,7. A partir dos valores da classificação verifica-se que o segundo troço (troço B) é o que apresenta o SMR mais reduzido. Os troços do talude possuem valores de SMR que se enquadram nas classes entre Normal-III e Boa-II, pelo que para as medidas de estabilização deverá ser utilizado o valor mais baixo.

O talude da Achada encontra-se parcialmente instável, pelo que, propõe-se a protecção do talude através de redes metálicas, bem como a utilização de betão

projectado no segundo troço, o que está de acordo com as recomendações de Romana para os valores de SMR compreendido entre 41 a 60 (normal). Esta classe é definida, de modo geral, por apresentar algumas roturas planares e muitas roturas por cunha.

Recomenda-se, ainda, o saneamento de blocos instáveis. Na zona do segundo troço propõem-se de modo pontual, a utilização de pregagens para os blocos rochosos de dimensões mais elevadas e que podem constituir situações de instabilidade;

TALUDE DA PEUGEOT

O menor valor do índice SMR que foi encontrado foi de 36,2 para o último troço (G) através de ruptura por basculamento. Os restantes valores obtidos ao longo do talude foram 87,5, 40,0 e 72,0, pertencentes aos troços D, E e F respectivamente. Os troços do talude possuem valores de SMR que se enquadram nas classes entre Má-IV e Muito Boa-I, pelo que para as medidas de estabilização foi utilizado o valor mais baixo.

Para o talude da Peugeot propõe-se a colocação de betão projectado nos troços E, F e G. Nos troços F e G, sugere-se a utilização de drenagem superficial, o que está de acordo com as recomendações de Romana para os valores de SMR concentrados entre 20 a 40. Esta classe é definida por roturas planares ou roturas por cunhas de grandes dimensões.

Sugere-se, ainda, que se retire os blocos instáveis ou então pontualmente no primeiro (D) e terceiro troço (F) propõe-se o reforço de blocos instáveis através de pregagens e ancoragens.

6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Relacionado o valor de ressalto do martelo de Schmidt com bibliografia existente de taludes da Ilha da Madeira na zona de β_2 , zona de estudo desta dissertação, verificou-se que os valores obtidos se encontram dentro do limite de valores atingidos.

Este capítulo apresenta a discussão e conclusões dos resultados obtidos, assim como é efectuado a comparação com dados alcançados em estudos anteriores. Nesta dissertação o valor médio de pico do ressalto de Schmidt é de 56,3 para o talude da

Achada e 63,2 para o talude da Peugeot. Segundo Pernetá (2010), o talude da Encumeada apresenta características litológicas semelhantes aos taludes em estudo, no entanto, o valor médio do ressalto do martelo nos ensaios na Encumeada rondou os 52, sendo um valor relativamente abaixo em comparação com os valores obtidos nos taludes do Funchal.

Apesar de, este valor ser relativamente baixo, em comparação com a dissertação de Pernetá (2010), ainda tem a agravante do valor do ressalto do esclerómetro ter sido obtido de maneira diferente, ou seja, das 20 medições iniciais, efectuou-se a média dos 10 superiores, ignorando a possível meteorização do talude. Nesta dissertação, os estudos foram feitos em superfícies expostas *fresh*, em discordância com Pernetá (2010) que não demonstrou preferência. Mesmo assim qualquer um dos taludes em estudo apresenta uma classificação de rocha muito dura.

Através dos resultados obtidos, foi possível relacionar o índice RQD com o valor do ressalto do esclerómetro de Schmidt. No talude da Achada os valores obtidos para o valor do ressalto concentraram-se entre o 54,8 e o 59,4, apresentando um valor de RQD de 79%. Por sua vez, no talude da Peugeot, o valor do ressalto, foi superior ao talude da Achada, e centrou-se nos valores 57,5 e 67,2. O valor de RQD para este talude foi de 93,4% e também obteve uma classificação superior. Segundo os resultados obtidos, considera-se que existe relação entre o RQD e o R do esclerómetro. À medida que RQD aumenta, R aumenta de forma linear.

Diferentes sistemas de classificação podem apresentar diferentes perspectivas. Não é possível estudar a interacção do índice RMR e do índice SMR devido ao facto do índice SMR ser uma extensão do índice RMR, com o ajuste do tipo de escavação efectuado e ainda da orientação do talude e descontinuidades.

Segundo Romana, *et al.*, (2003) quando $RMR > 40$, a estabilidade do talude é regida tanto pela orientação como pela resistência das descontinuidades.

Nestes taludes não é possível a colocação de valas ao pé dos taludes devido a proximidade com a estrada ser muito reduzida. Na escolha das medidas de estabilização, teve-se em atenção não só a segurança das pessoas e veículos que ocorrem ao local, mas também os aspectos de impacte visual.

7 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Vários objectivos já mencionados no início do trabalho, levaram ao desenvolvimento do estudo e avaliação dos processos de instabilidade dos taludes do Funchal. Os dois taludes em estudo apresentam características geomorfológicas que potenciam situações de instabilidade e risco. Há o maior interesse de proceder à investigação de factores que podem estar na origem destas situações, assim como soluções de estabilidade.

As principais conclusões são:

- No talude da Achada observou-se numerosas fracturas de extensões variadas, que podem atingir os 10 m. No talude da Peugeot as fracturas variam entre de pequena dimensão, cuja extensão é inferior a 1 metro, até cerca de 10 metros.
- Constitui causa da instabilidade do talude a orientação das descontinuidades, bem como a acumulação da água no interior do maciço, pois esta última provoca situações de queda de blocos, roturas planares e por basculamento.

Relativamente aos resultados obtidos da Classificação RMR de Bieniawski para os três troços do talude da Achada e da Peugeot, é possível dizer-se o seguinte:

- Com base nas determinações, em que se utilizou o martelo de Schmidt de tipo N, considerou-se que o material rochoso menos alterado do talude é definido como de resistência elevada.
- É de assinalar a existência de variações do grau de cimentação e do estado de alteração do material rochoso, que contribuem para que a resistência possa por vezes ser considerada mais baixa.
- As superfícies das descontinuidades, em ambos os taludes, de modo geral, apresentam-se desde lisas a ligeiramente rugosas.
- No talude da Achada, não se observou percolação de água nas superfícies de descontinuidades, enquanto no talude da Peugeot verificou-se zonas húmidas e ainda registou-se a existência de manchas de oxidação, relacionadas com a presença de água na maior parte das superfícies de descontinuidade.

- Os valores do RMR para o talude da Peugeot revelaram que o maciço rochoso apresenta uma maior resistência e é classificado como de qualidade boa. Os valores do talude da Achada apresentam um predomínio também de valores relativos à qualidade boa, apesar de serem mais baixos que os da Peugeot, de acordo com a classificação RMR.

Para definir as medidas de estabilidade do talude em estudo, utilizou-se o cálculo do SMR de Romana. O talude da Achada revelou valores distintos para os diferentes troços, de 67,4, 43 e 73,7, respectivamente para o 1º, 2º e 3º troço, pelo que se recomenda a colocação de redes de protecção metálica ao longo do talude, assim como o saneamento de blocos instáveis. Na zona do segundo troço propõem-se de modo pontual, a utilização de pregagens para os blocos rochosos de dimensões mais elevadas e que podem constituir situações de instabilidade;

Para o talude da Peugeot utilizou-se o mesmo método de estabilização, SMR. Os valores variam desde 86,5, 39, 71 e 35,2, respectivamente 1º, 2º, 3º e 4º troço, pelo que se sugere que se retire os blocos instáveis. Pontualmente no primeiro (D) e terceiro troço (F), propõe-se o reforço de blocos instáveis através de pregagens e ancoragens. No segundo (E) e quarto troço (G), com uma classificação má, propõe-se a drenagem superficial e colocação de betão projectado.

No talude da Peugeot, a discrepância de valores de SMR relaciona-se com a orientação das famílias de descontinuidades. Quando a orientação da família é semelhante com a orientação do talude (troço E e G), obtém-se um índice SMR baixo, enquanto, quando a orientação de ambos difere (troço D e F) o índice de SMR é mais elevado.

Confirmou-se a relação linear entre o índice de RQD e o valor de R do esclerómetro. Estabeleceu-se, ainda, a comparação dos diferentes resultados dos ensaios realizados, com resultados publicados também para materiais vulcânicos, da Ilha da Madeira, tendo-se verificado que estes se enquadram dentro da gama de valores publicados.

7.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se:

- A necessidade do estudo e desenvolvimento de um modelo hidrogeotécnico, que deverá ser elaborado para dar suporte às análises de estabilidade, abordando a importância da caracterização do nível freático e seu comportamento no maciço.
- A inserção dos parâmetros de resistência: densidade, coesão e ângulo de atrito.
- A inserção de métodos estatísticos que facilitaria muito a selecção de parâmetros a serem utilizados para os diversos litótipos presentes.
- Que sejam definidas potenciais situações de instabilidade nos taludes que pertencem ao concelho do Funchal, bem como investigar os factores que podem estar na sua origem. A cidade apresenta características geomorfológicas que potenciam situações de instabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, U. 2008. *Avaliação dos riscos naturais e seus impactos no ordenamento do território: aplicação ao município de Câmara de Lobos.* Universidade de Coimbra. Coimbra : s.n., 2008. p. 216, Dissertação de Mestrado.

Aggitalis, G., et al. 1996. Correlating Uniaxial Compressive Strength with Schmidt Hardness, Point Load Index, Young's Modulus and mineralogy of Gabbros and Basalts (Northern Greece). *Bulletin of the International Association of Engineering Geology.* Outubro 1996, p. 9.

Alberto, J. 2010. *Avaliação dos processos de instabilidade do talude da Capelinha da Nossa Senhora do Monte.* Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra. Coimbra : s.n., 2010. p. 73, Dissertação de Mestrado.

Aydin, A. and Basu, A. 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology.* 2005, pp. 1-14.

Aydin, A. 2008. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* 21 Abril 2008, pp. 627-634.

Barton, N. and Stephansson, O. 1990. *Rock Joints.* 1º. Rotterdam : Balkema, 1990. p. 821. ISBN 90 6191 109 5.

Bell, F. 2007. *Engineering Geology.* 2º. Oxford : Elsevier Ltd., 2007. p. 581. ISBN 0 7506 8077 6.

Bieniawski, Z. 1974. Estimating the Strength of Rock Materials. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy.* Março 1974, pp. 312-320.

Bieniawski, Z. T. 1989. *Engineering rock mass classifications.* 1º. s.l. : Wiley-Interscience, 1989. pp. 51-72. ISBN 0-471-60172-1.

Canha, E. 2007. *Património Natural da Madeira.* Departamento de Biologia, Universidade da Madeira . Funchal : s.n., 2007. p. 146, Dissertação de Mestrado.

Carvalho, G. e Brandão, J. 1991. *Geologia do Arquipélago da Madeira.* 1º. Lisboa : Museu nacional de história natural, 1991. p. 170. 51629/91.

Caracterização Geomecânica e Classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de Maciços Rochosos em taludes do Funchal

Coelho, S. 1996. *Tecnologia das Fundações*. Amadora : E. P. Gustave Eiffel, 1996.

Cordua, B. 1999. Columnar Joints. *Leaverite News*. Fevereiro 1999, p. 1.

Costa e Silva, M., et al. 2001. *Critérios para a caracterização geotécnica de maciços rochosos para obras subterrâneas*. Centro de Geotecnia, IST. Vidago : Ordem dos Engenheiros, 2001. p. 12, Congresso de Engenheiros.

Deere, D. and Miller, R. 1966. *Engineering classification and index properties for intact rock*. 1^o. New Mexico : University of Illinois, 1966. p. 300. Report AFNL-TR-65-116.

Deere, D., Hendron, A. and Patton, F. 1966. *Design Of Surface And Near-Surface Construction In Rock*. Minneapolis : American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers Inc. Permission to Distribute - American Rock Mechanics Association, 1966. p. 66.

Demirdag, S., Yavuz, H. and Altindag, R. 2009. The effect of sample size on Schmidt rebound hardness value of rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. Outubro 23, 2009, 46, pp. 725-730.

Dessert, C., et al. 2002. Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. *Chemical Geology*. 10 Outubro 2002, pp. 257-273.

Dinçer, Ismail, et al. 2004. Correlation between Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for andesites, basalts and tuffs. Janeiro 17, 2004, Vol. 63, p. 8.

Ferrer, M. e Vallejo, L. 1999. *Manual de Campo para la Descripción y Caracterización de Macizos Rocosos en Afloramientos*. Madrid : Instituto Tecnológico Geominero de España, 1999. p. 83. ISBN: 84-7840-387-6.

Ferrer, M. 2002. Rock Mechanics. [autor do livro] L. Vallejo, et al. *Ingeniería Geológica*. 2^o. Madrid : Pearson Educación, 2002, III; IX; XIII, pp. 117-236; 429-286; 607-620.

Filho, R. 2003. *Os condicionantes geologico-geotecnicos em obras de usinas hidroelectricas*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto : s.n., 2003. pp. 18-21, Pós-Graduação.

Geldmacher, J., et al. 2000. *The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age dating of the Madeira Archipelago and hotspot track (eastern North Atlantic)*. Kiel : AGU and the Geochemical Society, 2000. p. 1. doi:10.1029/1999GC000018. .

Giani, G. 1992. *Rock slope stability analysis*. Rotterdam : Balkema, 1992. p. 361. ISBN 90 5410 122 9.

Goehring, L. and Morris, S. 2008. The scaling of columnar joints in basalt. *Journal of Geophysical Research*. 2008, p. 16.

Grabham, G. 1948. Esboço da formação geológica da Madeira. *Boletim do Museu Municipal do Funchal*. 1948, Vol. III, pp. 65-83.

Harrison, J. and Hudson, J. 2005. *An Introduction to the Principles*. 4^o. London : Elsevier, 2005. pp. 193-202. ISBN: 0-08-043864-4.

Hoek, E. and Bray, J. 1981. *Rock Slope Engineering*. 3^o. London : Institution of Mining and Metallurgy, 1981. p. 358. ISBN 0 419 16010 8.

Hoek, E., Kaiser, P. K. and Bawden, W. F. 2000. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. 4^o. Rotterdam : A. A. Balkema, 2000. p. 223. ISBN 89 5410 187 3.

Hudson, J. 1993. Rock Testing and Site Characterization. [book auth.] M. R. Romana. *A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating*. 1^o. Oxford : Pergamon Press, 1993, Vol. III, p. 45.

Instituto da Água. 2003. *Plano Regional da Água da Madeira*. Região Autónoma da Madeira. 2003. p. 328, Relatório Técnico.

Katz, O., Reches, Z. and Roegiers, J. 1999. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 16 Dezembro 1999, p. 6.

Lima, C. e Menezes, J. 2008. Geologia de Engenharia. *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*. [Online] 2008. [Citação: 15 de Julho de 2011.] http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_4_GE.pdf.

Maia, J. 2003. *Metodos Probabilisticos aplicados à estabilização de taludes e cavidades em rocha*. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília : s.n., 2003. p. 228, Dissertação de Mestrado. G.DM-099A/03.

Caracterização Geomecânica e Classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de Maciços Rochosos em taludes do Funchal

Mascarenhas, J. 2006. *Sistemas de construção: descrição ilustrada e detalhada de processos construtivos utilizados correntemente em Portugal*. 4.º. s.l.: Livros Horizonte, 2006. p. 232 . ISBN 9789722413398.

Mata, J. 1996. *Petrologia e geoquímica das lavas da ilha da Madeira: implicações para os modelos de evolução mantélica*". Lisboa : Universidade de Lisboa, 1996. Tese de Doutoramento.

McClure, K. 1999. The utility of joints in interpreting the geologic history of the Tertiary rocks of the Crawfish Lake Quadrangle. *12th, Keck research symposium in geology*. 1999, pp. 267-270.

Miranda, T., Gomes Correia, A. e Ribeiro e Sousa, L. 2005. Determinação de Parâmetros Geomecânicos em formações rochosas e Maciços Heterogéneos. [ed.] A. Correia. *Revista*. 24, Setembro de 2005, p. 24.

Moura, F. 2006. *Os túneis rodoviários da Ilha da Madeira - Metodologias relativas à segurança durante a construção*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho. Guimarães : s.n., 2006. p. 137, Dissertação de Mestrado.

Navarre-Sitchler, A. and Brantley, S. 2007. Basalt weathering across scales. *Earth and Planetary Science Letters*. 17 Julho 2007, pp. 321-334.

Niedzielski, T., Migon, P. and Placek, A. 2009. A minimum sample size required from Schmidt hammer measurements. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2009, Vol. 34, pp. 1713-1725.

Ortigão, J. A. e Sayão, A. 1999. *Estabilização de taludes - Experiência Brasileira em Maciços de Solos Residuais*. Porto : FEUP, 1999.

Ortigão, J. and Sayão, A. 2004. *Handbook of slope stabilisation*. Nova Iorque : Springer-Verlag, 2004. p. 478. ISBN 3-540-41646-3.

Palmstrom, A. 1982. The volumetric Joint Count - A useful and simple measure of the degree of Jointing. 1982, pp. 221-228.

Perneta, J. 2010. *Caracterização Geológica e Geotécnica dos Complexos Vulcânicos Antigo e Intermédio da Ilha da Madeira*. Ciências Exactas, Universidade da Madeira. Funchal : s.n., 2010. p. 127, Dissertação de Mestrado.

Prada, S. and Serralheiro, A. 2000. *Stratigraphy and evolutionary model of Madeira Island*. Museu Municipal do Funchal. Funchal : Bocagiana 200, 2000. p. 13.

Prada, S. 2000. *Geologia e Recursos Hídricos Subterrâneos da Ilha da Madeira*. Funchal : Universidade da Madeira, 2000. p. 383, Tese de Doutoramento .

Price, D. 1993. A suggested method for the classification of rock mass weathering by a ratings system. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology*. Fevereiro 1993, pp. 69-76.

Ribeiro, V. 2010. *Abrasividade Pendular e a resistencia mecanica das rochas*. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo : s.n., 2010. p. 69, Dissertação Mestrado.

Rodrigues, D. 2005. *Análise de risco de movimentos de vertente e ordenamento do território na Madeira : aplicação ao caso de Machico*. Departamento de Geologia, Universidade da Madeira. Funchal : s.n., 2005. p. 407, Dissertação de Mestrado.

Romana, M., Serón, J. and Montalar, E. 2003. SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation. *ISRM 2003-Technology roadmap for rock mechanics*. 2003, p. 4.

Singh, B. and Goel, R. K. 1999. *Rock Mass Classification*. Oxford : Elsevier Science, 1999. p. 267. ISBN 0 08 043013 9.

Spry, A. 1962. The Origin of Columnar Jointing, particularly in basalt flows. *Journal of the Geological Society of Australia*. Setembro 7, 1962, pp. 191-216.

Sumner, P. and Nel, W. 2002. The effect of rock moisture in Schmidt hammer rebound: tests on rock samples from Marion Island and South Africa. *Earth Surface Processes and Landforms*. 29 Abril 2002, pp. 1137-1142.

Tabalipa, N. e Fiori, A. 2008. Influência da vegetação na estabilidade de taludes. 23 de Dezembro de 2008, Vol. 27, pp. 387-399.

Telford, T. and Chandler, R. 1991. *Slope Stability Engineering*. 2º. Isle of Wight : Institution of Civil Engineers (Great Britain), 1991. p. 443. ISBN 0-7277-1661-3.

Vallejo, L. 2002. Introduction to Geological Engineering. [autor do livro] L. Vallejo, et al. *Ingeniería Geológica*. 2º. Madrid : Pearson Educación, 2002, I; VI, pp. 1-16; 303-374.

Caracterização Geomecânica e Classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de Maciços Rochosos em taludes do Funchal

Varnes, D. 1978. *Slope Movement Types and Processes*. [ed.] R. Schuster and R. Krizek. s.l. : National Research Council, 1978. pp. 11-33. ISSN 0360-859X.

Viles, H., et al. 2010. The use of the Schmidt Hammer and Equotip for rock hardness assessment in geomorphology and heritage science: a comparative analysis. *Earth surface processes and landforms*. 5 Julho 2010, pp. 320-333.

Waters, A. 1960. Determining Direction of Flow in Basalts. *American Journal of Science*. 1960, pp. 350-366.

Weijden, C. and Pacheco, F. 2003. Hydrochemistry, weathering and weathering rates on Madeira Island. *Journal of Hydrology*. 1 Julho 2003, pp. 122-145.

Yagiz, S. 2008. Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer. *Predicting geotechnical properties using Schmidt hammer*. 1 Novembro 2008, pp. 55-63.

Yilmaz, I. and Sendir, H. 2002. Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus. *Engineering Geology*. 2 January 2002, pp. 211- 219.

Zbyszewski, G., et al. 1975. Carta Geológica de Portugal. *Notícia explicativa da Ilha da Madeira*. 1975.

Zenóbio, A. and Zuquette, L. 2006. Application of geomechanical classifications on the rocky slopes of Serra de Ouro Preto. *Geotechnical mapping of rock masses in natural slopes using geomechanical classifications*. 2006, p. 8.

Zhao, Jian. s. d.. Rock Mechanics for Civil Engineers. *Rock Mechanics*. s. d.

Zostrich Geotechnical. Zostrich Geotechnical. *Ursa Engineering*. [Online] [Cited: Maio 10, 2011.] http://www.zostrich.com/Rock_mech_PDF/RMR.pdf.

ANEXO I

ÍNDICE DO MARTELO DE SCHMIDT [R]

Localização Achada; Rua Dr. João Serra Velez Caroço

Coordenadas N 32°39'6,82"; W 16°55'8,86"

Data 11 e 16 de Agosto 2011

	Troço A		Troço B			Troço C		
	62,5	61,5	60	62,0	61,5	60,5	59,5	62
	62,2	61,4	58,8	59,3	59,0	59,7	59	61,8
	60,5	59,9	58	57,8	57,5	58,0	58,2	61
	60,5	57,9	57	55,8	55,5	56,2	55,8	50,2
	59,4	57,9	56,2	55,8	55,5	56,0	55,3	59
	59,2	57,3	56,2	55,2	54,8	55,5	55	58,5
	58,5	57,2	52	55,0	54,8	55,3	53	58
	58	54,7	52	52,5	52,3	52,8	52	55,3
	57,5	53,9	51	51,8	51,5	52,5	51,5	52,8
	56	52,9	50,3	50,8	50,5	51,0	49	50
Média	59,4	57,4	55,2	55,6	55,3	55,7	54,8	56,9

Localização Peugeot; Rua Dom Ernesto Sena de Oliveira

Coordenadas N 32°39'35,06"; W 16°54'4,55"

Data 17 e 27 de Agosto 2011

	Zona D			Zona E		Zona F	Zona G	
	64,1	69	62	65	70,5	66,1	68,3	68,1
	64	68,3	61	63	69	65	68	68
	63	68	58,3	62,3	68,8	64	67,8	66,1
	62,1	67,8	58	62,2	68,5	64	67,3	64
	61,2	66,7	57,5	62	68	64	66	63,8
	61	66	57	61	66,5	63	66	62,1
	60,5	65	57	61	66	63	65	61,8
	58	65	56,7	59	65,8	63	64	61,6
	58	64,8	56	58	64,3	63	64	58,2
	56	64,1	55	55	62	62	61	58
Média	60,8	66,5	57,9	60,9	66,9	63,7	65,7	63,2

