



Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia

Caracterização e Classificação Geomecânica de Taludes Rochosos. Aplicação a Caso de Estudo

Licenciado em Engenharia Civil (Pós-Bolonha)

Dissertação submetida para o grau de Mestre em Engenharia Civil na Universidade da
Madeira

por

CLÁUDIO FRANCISCO FERREIRA GONÇALVES

Orientador

Prof. Doutor João Paulo Martins da Silva Lobo

(Universidade da Madeira)

Novembro de 2016

Caracterização e Classificação Geomecânica de Taludes Rochosos.
Aplicação a Caso de Estudo.

Título: Caracterização e Classificação Geomecânica de Taludes Rochosos. Aplicação a Caso de Estudo.

Palavras-Chave: Talude rochoso; Instabilidade de taludes; Descontinuidades; Classificações RMR e GSI;
Fator de segurança.

Keywords: Rock slope; Slope instability; Discontinuities; Ratings RMR and GSI; Safety factor.

Autor: CLÁUDIO GONÇALVES

FCEE - Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia

Campus Universitário de Penteadá

9020-015 Funchal – Portugal, s/n

Telefone +351 291 705 230

Correio eletrónico: secretariadocentros@uma.pt

Funchal, Madeira

Caracterização e Classificação Geomecânica de Taludes Rochosos.
Aplicação a Caso de Estudo.

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de mestrado foi o culminar de um objetivo académico traçado, resultado de muitos anos de estudo, dedicação e sacrifício, apenas possível de alcançar graças ao incentivo e apoio de diversas pessoas. A todos os que me ajudaram, ou simplesmente me apoiaram, os meus sinceros agradecimentos. Quando se realiza um trabalho desta índole, apercebe-se da importância concreta de quem nos apoia para a sua realização, merecendo por isso o meu sincero agradecimento:

- ❖ À minha família, a quem dedico este trabalho, em especial ao meu irmão e aos meus pais pelo esforço a que se propuseram para que conseguisse a minha formatura, cujo o sacrifício e apoio constantes me possibilitaram ser tudo o que sou e tudo o que tenho.
- ❖ Ao meu orientador, Prof. João Paulo Martins da Silva Lobo por todo o apoio e disponibilidade demonstrada durante este ano e por ter sido incansável na orientação desta dissertação, através da partilha do seu enorme conhecimento e experiência na área da Geotecnia.
- ❖ À empresa Tecnovia Madeira - Sociedade de Empreitadas S.A., que teve a disponibilidade de me acolher na sua empreitada. Agradeço ainda a todos aqueles dentro da empresa que contribuíram para a realização deste trabalho, em particular ao Eng.º Roberto e ao Sr. Celestino.
- ❖ Aos meus amigos e colegas, pela alegria nas horas boas e pelo apoio nas menos boas que contribuíram com o seu companheirismo para este percurso académico, e sem o apoio dos quais tudo seria mas difícil. Por fim agradeço ao Sr. Vítor Silva pelo seu apoio e disponibilidade durante o processo de revisão ortográfica do presente trabalho.

A todos o meu profundo e sentido obrigado.

Caracterização e Classificação Geomecânica de Taludes Rochosos.
Aplicação a Caso de Estudo.

RESUMO

O estudo do comportamento de taludes rochosos tem vindo a ganhar relevância nas últimas décadas, pois a sua instabilidade pode resultar em danos materiais avultados e provocar numerosas vítimas. Todas estas consequências podem ser diminuídas com o estudo de estabilidade dos taludes em maciços rochosos.

O maciço rochoso é definido como uma entidade constituída por duas parcelas, material-rocha e descontinuidades que o compartimentam. A qualidade do talude é descrita através da análise destas duas componentes. No caso em que a rocha apresenta elevada resistência, a rotura do maciço é, essencialmente, condicionada pelas características das descontinuidades presentes.

O presente trabalho tem como objetivo abordar a caracterização geológica e geotécnica, aplicar as classificações geomecânicas e analisar a estabilidade de um talude rochoso selecionado como caso de estudo. Para concretizar esses objetivos foi efetuada uma caracterização das descontinuidades, sendo estas as estruturas principais que condicionam os modos de rotura em taludes rochosos. Procurou-se dar especial ênfase a aplicação das classificações geomecânicas, em particular à classificação para taludes em maciços rochosos, nomeadamente as classificações: *Rock Mass Rating* (RMR) e *Geological Strength Index* (GSI), que permite compreender e quantificar a qualidade de um talude. Estas foram aplicadas a dois taludes, que foram submetidos a vários estudos de campo para determinação dos parâmetros necessários. Determinaram-se os prováveis fatores de instabilidade do talude, destacando-se as propriedades geomecânicas, a geometria do talude e a distribuição das descontinuidades.

Para a análise da estabilidade global de um talude recorreu-se a um programa de calculo automático, *software* SLIDE 6.0. Os modelos realizados para o estudo da estabilidade foram baseados nas observações de caracterização geotécnica e geológica.

Por fim, apresenta-se as características gerais da obra de estabilização do talude rochoso em análise. A escavação foi efetuada com recurso a meios mecânicos, sendo apresentado as várias fases de execução e o faseamento construtivo da estabilização do talude assim como as tecnologias utilizadas no processo.

Palavras-Chave: Talude rochoso; Instabilidade de taludes; Descontinuidades; Classificações RMR e GSI; Fator de segurança.

Caracterização e Classificação Geomecânica de Taludes Rochosos.
Aplicação a Caso de Estudo.

ABSTRACT

The study of rocky slopes has been gaining more importance in the last decade, their instability can result in substantial material damage and cause innumerous victims. All these consequences can decrease if we study the stability of the rocky slopes in rock mass.

The rock mass is defined as an entity composed of two portions: material-rock and discontinuities. The quality of the rocky slope is described by analyzing these two components. When the rock presents high strength, the rupture of the massif is conditioned by discontinuities.

The objective of this work is to study the geological characterization and geotechnical, apply geomechanical ratings and examine the stability of rocky slope. To achieve these objectives, a characterization of discontinuities was made because they are the principal structures that influence the rupture of rocky slope. This work will give a special emphasis to the application of geomechanical classifications, in particular the classification for slope in rock masses, notably for classifications like: *Rock Mass Rating* (RMR) and *Geological Strength Index* (GSI), in way to understand the slope. These were applied to the two slopes, which were chosen to be submitted to a lot of studies to determine the necessary parameters. It was determined the probable slope instability factors, highlighting the geomechanical properties, the geometry of the slope and the distribution of discontinuities.

To analyze the overall stability of a slope an automatic calculation program was used, the *software* SLIDE 6.0. The models used for the study of stability were based on observations of geotechnical and geological characterization.

Finally, it is presented the general characteristics of the rocky slope stabilization work in analysis. The excavation was carried out using mechanical means, being presented the various stages of the implementation and constructive phasing of slope stabilization as well as the technologies used in the process.

Keywords: Rock slope; Slope instability; Discontinuities; Ratings RMR and GSI; Safety factor.

Caracterização e Classificação Geomecânica de Taludes Rochosos.
Aplicação a Caso de Estudo.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE GERAL	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS	XVII
ÍNDICE DE EQUAÇÕES	XIX
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XXI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Metodologia.....	4
1.4 Estrutura	6
2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO DE TALUDES ROCHOSOS	7
2.1 Generalidades	7
2.2 Etapas do estudo.....	8
2.3 Características das descontinuidades.....	9
2.4 Propriedades físicas e mecânicas de taludes rochosos.....	14
2.4.1 Metodologia.....	14
2.4.2 Reconhecimento geológico e cartografia das superfícies do maciço	15
2.4.3 Caracterização do maciço rochoso	17
2.4.3.1 Número e orientação das descontinuidades	17
2.4.3.2 Tamanho dos blocos	18
2.4.3.3 Grau de decomposição.....	20
2.4.3.4 Estado de fracturação.....	20
2.4.4 Caracterização das descontinuidades.....	20
2.4.4.1 Atitude geológica.....	21
2.4.4.2 Espaçamento e espessura das camadas	23
2.4.4.3 Continuidade ou persistência	24
2.4.4.4 Rugosidade	25
2.4.4.5 Resistência das paredes das descontinuidades	27
2.4.4.6 Abertura	28

2.4.4.7 Material de preenchimento.....	29
2.4.4.8 Estado de meteorização.....	30
2.4.4.9 Percolação de água.....	31
3. CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA E TÉCNICAS DE ESTABILIDADE DE TALUDES ROCHOSOS	33
3.1 Generalidades.....	33
3.2 Taludes	33
3.2.1 Tipos de instabilidade em taludes	34
3.2.1.1 Rotura planar	35
3.2.1.2 Rotura em cunha	36
3.2.1.3 Rotura por tombamento	36
3.3 Classificações geomecânicas de taludes	37
3.3.1 Generalidades	37
3.3.2 Classificação RMR (Rock Mass Rating).....	39
3.3.2.1 Aplicação do RMR.....	42
3.3.2.2 RQD (Rock Quality Designation).....	44
3.3.3 Classificação GSI (Geological Strength Index).....	45
3.4 Análise de estabilidade.....	47
3.5 Técnicas de estabilização de taludes.....	51
3.5.1 Medidas de proteção.....	51
3.5.1.1 Redes metálicas.....	51
3.5.1.2 Drenagem.....	52
3.5.1.3 Valas de pé de talude.....	53
3.5.1.4 Barreiras dinâmicas	53
3.5.2 Reforço com inclusões	54
3.5.2.1 Pregagens.....	54
3.5.2.2 Ancoragens.....	55
3.5.3 Reforço com betão	55
3.5.3.1 Betão projetado.....	55
3.5.3.2 Muros de contenção	56
4. CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DO TALUDE SOBRANCEIRO À E.R. 222 NO SÍTIO DA RATEIRA	57
4.1 Localização	57
4.2 Trabalhos de campo	58
4.3 Características gerais dos taludes.....	59
4.4 Caracterização geológica e geotécnica	60

4.4.1 Enquadramento geomorfológico.....	60
4.4.2 Unidades geológicas.....	62
4.4.3 Condições tectónico-estruturais.....	63
4.4.4 Condições hidrogeológicas.....	64
4.5 Estado atual dos taludes.....	65
4.6 Descrição dos parâmetros das classificações geomecânicas.....	66
4.6.1 Caracterização das descontinuidades.....	66
4.6.2 Resistência do material rochoso.....	69
4.6.3 Determinação do valor de RQD.....	70
4.7 Aplicação das classificações geomecânicas.....	71
4.7.1 Classificação RMR.....	72
4.7.1.1 Fator de correção.....	73
4.7.1.2 Determinação das propriedades do maciço rochoso pelo RMR.....	73
4.7.2 Classificação GSI.....	75
5. ANÁLISE DE ESTABILIDADE E TÉCNICAS APLICADAS NA ESTABILIZAÇÃO DO TALUDE SOBRANCEIRO À E.R. 222 NO SÍTIO DA RATEIRA	79
5.1 Análise de estabilidade com o Software.....	79
5.1.1 Parâmetros geomecânicos para o talude A.....	79
5.1.2 Análise paramétrica para o talude A.....	80
5.1.2.1 Análise de estabilidade do talude A.....	82
5.1.3 Análise de estabilidade do talude A, após a intervenção	88
5.2 Descrição geral das soluções aplicadas em obra	90
5.2.1 Considerações gerais	90
5.2.2 Talude A	90
5.2.2.1 Solução de desmonte	90
5.2.2.2 Muro de suporte no topo do talude.....	95
5.2.2.3 Drenagem.....	96
5.2.2.4 Observações	97
5.2.3 Talude B	97
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
6.1 Conclusões do trabalho realizado	99
6.2 Recomendações para desenvolvimentos futuros.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
ANEXOS.....	107
Anexo A – Valores da constante m_i	108

<i>Anexo B – Planta e alçados geologia</i>	<i>109</i>
<i>Anexo C – Cortes geológicos transversais esquemáticos</i>	<i>112</i>
<i>Anexo D – Alguns exemplos do cálculo do fator de segurança pelo SLIDE 6.0.....</i>	<i>115</i>
<i>Anexo E – Cálculo da estabilidade global.....</i>	<i>120</i>
<i>Anexo F – Fotos da execução da estabilidade do talude A.....</i>	<i>123</i>
<i>Anexo G – Fotos da execução da estabilidade do talude B</i>	<i>131</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - MODOS FUNDAMENTAIS DE GERAÇÃO DE ESTRIAS EM DIACLASAMENTO.....	11
FIGURA 2 - PRINCIPAIS TIPOS DE DIÁCLASES NUM MACIÇO MAGMÁTICO	11
FIGURA 3 - REJEITO DE UMA FALHA	13
FIGURA 4 - TIPOS DE FALHAS	13
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DO NÚMERO DE FAMÍLIAS NUM BLOCO-DIAGRAMA.....	18
FIGURA 6 - ORIENTAÇÃO DE UMA DESCONTINUIDADE	22
FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DAS FAMÍLIAS PRINCIPAIS NO DIAGRAMA DE ROSETAS.....	22
FIGURA 8 - MEDIÇÃO DO ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES.....	23
FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO SIMPLES E BLOCOS-DIAGRAMA ESQUEMÁTICA.....	25
FIGURA 10 - PERFIS DE RUGOSIDADE	26
FIGURA 11 - ILUSTRAÇÃO DE ABERTURAS DAS DESCONTINUIDADES.....	28
FIGURA 12 - REPRESENTAÇÃO DE TALUDES	34
FIGURA 13 - ROTURA PLANAR.....	35
FIGURA 14 - ROTURA EM CUNHA.....	36
FIGURA 15 - ROTURA POR TOMBAMENTO	37
FIGURA 16 - TAROLOS REPRESENTATIVOS DA QUALIDADE DO MACIÇO ROCHOSO	45
FIGURA 17 - VALOR DO ÍNDICE GSI	46
FIGURA 18 - DESENHO TIPO DE REDES SUSPENSAS.....	52
FIGURA 19 - DESENHO TIPO DE REDES PREGADAS.....	52
FIGURA 20 - DRENO SUB-HORIZONTAL INSTALADO NUMA SOLUÇÃO DE PREGAGENS	53
FIGURA 21 - CORTE E ALÇADO TIPO DE UMA BARREIRA DINÂMICA.....	53
FIGURA 22 - DESENHO TIPO DE UMA PREGAGEM	54
FIGURA 23 - DESENHO TIPO DE UMA ANCORAGEM.....	55
FIGURA 24 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	57
FIGURA 25 - VISTA GERAL DO TALUDE A.....	59
FIGURA 26 - VISTA GERAL DO TALUDE B.....	59
FIGURA 27 - CARTA GEOLÓGICA SIMPLIFICADA	60
FIGURA 28 - CARACTERÍSTICAS DO TALUDE A	61
FIGURA 29 - PORMENOR DO TALUDE B.....	62
FIGURA 30 - ÍNDICE GSI BASEADO NA ESTRUTURA E CONDIÇÕES DAS DESCONTINUIDADES.....	76
FIGURA 31 - ENVOLVENTE DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA ϕ' E C' PARA O COMPLEXO VULCÂNICO B ₂	81
FIGURA 32 - ILUSTRAÇÃO DOS CORTES EM SLIDE 6.0	82

FIGURA 33 - EXEMPLO DO SLIDE 6.0.....	83
FIGURA 34 - VARIAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA EM FUNÇÃO DA COESÃO.....	86
FIGURA 35 - VARIAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO.....	88
FIGURA 36 - PROTEÇÃO COLOCADA NA BERMA DA ESTRADA E NA HABITAÇÃO	91
FIGURA 37 - DESMONTE DO TALUDE A.....	91
FIGURA 38 - PRIMEIRA CAMADA DE BETÃO PROJETADO	92
FIGURA 39 - MALHA E PREGAGENS EM QUINCÔNCIO	93
FIGURA 40 - SEQUÊNCIA DA ESTABILIZAÇÃO DE UM TALUDE DE ESCAVAÇÃO	94
FIGURA 41 - MURO DE SUPORTE NO TOPO DO TALUDE.....	95
FIGURA 42 - MALHA DE BUEIROS	96
FIGURA 43 - VALETA DE MEIA MANILHA E CAIXA DE REUNIÃO	97
FIGURA 44 - BARREIRA DINÂMICA NO TALUDE B.....	98

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES QUANTO AO TIPO	10
TABELA 2 - DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS TIPOS DE DIÁCLASES EM ROCHAS MAGMÁTICAS.	12
TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS QUANTO AO NÚMERO DE FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES	18
TABELA 4 - CLASSIFICAÇÃO DO TAMANHO DOS BLOCOS ROCHOSOS COM BASE NO ÍNDICE VOLUMÉTRICO	19
TABELA 5 - CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS EM FUNÇÃO DO TAMANHO E FORMA DOS BLOCOS	20
TABELA 6 - CLASSIFICAÇÃO DO ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES SEGUNDO A ISRM.....	24
TABELA 7 - CLASSIFICAÇÃO DA ESPESSURA DAS CAMADAS SEGUNDO A ISRM.....	24
TABELA 8 - DESCRIÇÃO DA CONTINUIDADE DAS DESCONTINUIDADES.....	25
TABELA 9 - CLASSIFICAÇÃO DA RUGOSIDADE DAS DESCONTINUIDADES.....	26
TABELA 10 - TERMINOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO DE RESISTÊNCIA	27
TABELA 11 - DESCRIÇÃO DO GRAU DE ALTERAÇÃO METEÓRICA	28
TABELA 12 - CLASSIFICAÇÃO DA ABERTURA DAS DESCONTINUIDADES	29
TABELA 13 - DESCRIÇÃO DO ENCHIMENTO.....	30
TABELA 14 - GRAU DE ALTERAÇÃO PROPOSTOS PELA ISRM E GSE.....	31
TABELA 15 - CLASSIFICAÇÃO DA PERCOLAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES.....	32
TABELA 16 - DESCRIÇÃO DE PRESENÇA DE ÁGUA NAS DESCONTINUIDADES	32
TABELA 17 - CAUSAS DE INSTABILIDADE DE TALUDES.....	35
TABELA 18 - CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR	40
TABELA 19 - CLASSIFICAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES 1 – RMR	40
TABELA 20 - CLASSIFICAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES 2 – RMR	41
TABELA 21 - FATORES CORRETIVOS CONSOANTE A ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES	41
TABELA 22 - CLASSE DO MACIÇO	41
TABELA 23 - SIGNIFICADO DAS CLASSES.....	42
TABELA 24 - CLASSIFICAÇÃO DA QUALIDADE DO MACIÇO ROCHOSO TENDO EM CONTA O VALOR DE RQD	44
TABELA 25 - CLASSE DO MACIÇO ROCHOSO DETERMINADO A PARTIR DO GSI.....	46
TABELA 26 - FATORES QUE INFLUENCIAM A ESTABILIDADE DOS TALUDES	48
TABELA 27 - CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE E RESPETIVOS FATORES DE SEGURANÇA DE TALUDES.....	50
TABELA 28 - CARACTERÍSTICAS DOS MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE.....	50
TABELA 29 - RESUMO DOS DADOS RELEVANTES PARA CADA UM DOS TALUDES.....	58
TABELA 30 - PRINCIPAIS PARÂMETROS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS DOS DOIS TALUDES.....	71
TABELA 31 - VALORES PONDERAIS DOS PARÂMETROS DA CLASSIFICAÇÃO RMR.....	72
TABELA 32 - FATORES DE CORREÇÃO	73

TABELA 33 - CLASSIFICAÇÃO GSI.....	77
TABELA 34 - PARÂMETROS RESISTENTES DO MACIÇO ROCHOSO.....	82
TABELA 35 - RESULTADOS DO F.S. PARA O CORTE 1-1	83
TABELA 36 - RESULTADOS DO F.S. PARA O CORTE 2-2	84
TABELA 37 - RESULTADOS DO F.S. PARA O CORTE 3-3	84
TABELA 38 - PARÂMETROS RESISTENTES DO MACIÇO UTILIZADO NA PRIMEIRA PARAMETRIZAÇÃO	85
TABELA 39 - VALORES DO FATOR DE SEGURANÇA PARA A PRIMEIRA PARAMETRIZAÇÃO	86
TABELA 40 - PARÂMETROS RESISTENTES DO MACIÇO UTILIZADO NA SEGUNDA PARAMETRIZAÇÃO	87
TABELA 41 - VALORES DO FATOR DE SEGURANÇA PARA A SEGUNDA PARAMETRIZAÇÃO.....	87
TABELA 42 - COEFICIENTES GLOBAIS DE SEGURANÇA PARA A SITUAÇÃO DE CÁLCULO	89

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 - ÍNDICE DE AFLORAMENTO VOLUMÉTRICO	19
EQUAÇÃO 2 - FREQUÊNCIA DE DESCONTINUIDADES	19
EQUAÇÃO 3 - FREQUÊNCIA TOTAL DE DESCONTINUIDADES	19
EQUAÇÃO 4 - MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DE UM MACIÇO QUANDO $RMR > 50$	42
EQUAÇÃO 5 - MÓDULO DE DEFORMABILIDADE DE UM MACIÇO QUANDO $RMR < 50$	42
EQUAÇÃO 6 - DETERMINAÇÃO DA COESÃO A PARTIR DO RMR	43
EQUAÇÃO 7 - DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO A PARTIR DO RMR	43
EQUAÇÃO 8 - CRITÉRIO GENERALIZADO DE HOEK-BROWN	43
EQUAÇÃO 9 - VALOR REDUZIDO DA CONSTANTE m_i	43
EQUAÇÃO 10 - VALOR DA CONSTANTE S	43
EQUAÇÃO 11 - VALOR REDUZIDO DA CONSTANTE m_i	43
EQUAÇÃO 12 - VALOR DA CONSTANTE S	44
EQUAÇÃO 13 - CÁLCULO DO ÍNDICE RQD.....	44
EQUAÇÃO 14 - ESTIMATIVA DO VALOR DE RQD ATRAVÉS DO ÍNDICE DE AFLORAMENTO.....	44
EQUAÇÃO 15 - ESTIMATIVA DO VALOR DE RQD ATRAVÉS DA FREQUÊNCIA.....	45
EQUAÇÃO 16 - ESTIMATIVA DO VALOR DE GSI PELA CLASSIFICAÇÃO RMR	47
EQUAÇÃO 17 - VALOR REDUZIDO DA CONSTANTE m_i	47
EQUAÇÃO 18 - VALOR DA CONSTANTE S	47
EQUAÇÃO 19 - VALOR DA CONSTANTE a	47
EQUAÇÃO 20 - FATOR DE SEGURANÇA.....	50

Caracterização e Classificação Geomecânica de Taludes Rochosos.
Aplicação a Caso de Estudo.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Abreviaturas:

BGD	Basic Geotechnical Descripton
ER	Estrada Regional
FS	Fator de Segurança
GSE	Geological Society Engineering
GSI	Geological Strength Index
IAEG	International Association for Engineering Geology
ISRM	International Society for Rock Mechanics
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Rock Quality Designation

Notação:

\emptyset	Ângulo de atrito
β	Basaltos
Br	Brechas
c	Coesão efetiva do maciço
β^2	Complexo vulcânico Pós-Miocénico
m_i	Constante dependente das propriedades da rocha intacta
a, S	Constantes dependentes das propriedades da rocha (Hoek-Brown)
DC	Depósitos de cobertura
α	Direção do plano de descontinuidade
F_{dst}	Força destabilizadora
F_{stb}	Força estabilizadora
λ	Frequência de descontinuidades
β_i	Inclinação do plano de descontinuidade
ψ	Inclinação do talude
J_v	Índice do número de descontinuidades por unidade de volume
E_M	Módulo de deformabilidade do maciço rochoso
D	Parâmetro de perturbação do maciço devido a escavação
γ	Peso volúmico

σ_{cm}	Resistência à compressão do maciço rochoso
σ_c	Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta
σ_1	Tensão principal máxima ou tensão axial
σ_3	Tensão principal mínima ou tensão de compressão
T	Tufos
m_b	Valor reduzido do parâmetro m_i

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A presente dissertação enquadra-se no âmbito da unidade curricular Dissertação/Projeto/Estágio, realizada para a conclusão do Mestrado do 2º ciclo em Engenharia Civil, lecionado na Universidade da Madeira. Esta dissertação pretende abordar os aspetos geológicos e geotécnicos envolvidos no comportamento de taludes rochosos, tendo como principal objetivo a caracterização e classificação geomecânica de dois taludes rochosos, localizados no concelho da Ponta do Sol, junto à estrada regional ER 222. Este local foi considerado de elevado risco geotécnico, pelo Governo Regional da Madeira, tendo sido intervencionado (Europeus, 2016). Ambos os taludes, objeto de estudo nesta dissertação, foram alvo de desprendimentos de blocos de gramométrica pequena, para a plataforma rodoviária ao longo dos anos. Esta situação acarreta alguns perigos para a população local, outro público e ecossistemas associados. Este risco deve-se à localização dos taludes junto a uma importante Estrada Regional.

Com a finalidade de identificar potenciais situações de instabilidade, recorre-se ao conhecimento das características geológicas e geomorfológicas, com o intuito de que compreendendo as características mais importantes pode-se determinar as medidas de estabilização e prevenção que podem ser aplicadas a um determinado local. O interesse para a realização deste trabalho surgiu da observação das condições climáticas e geomorfológicas da Região Autónoma da Madeira que conduzem a formações de taludes rochosos com inclinações muito acentuadas, o que promove desastres associados aos movimentos de massa.

Os taludes rochosos, por serem de origem natural, apresentam características heterogéneas quanto às suas propriedades e, em casos particulares, de difícil identificação. Com o objetivo de minimizar os gastos desnecessários e evitar impactos ambientais, as investigações devem ter em conta uma análise quantitativa tendo por base as diversas propriedades do maciço rochoso, sendo estas favoráveis ou desfavoráveis.

Ao longo dos anos julgou-se que a massa rochosa que compõem os maciços seria sinónimo de segurança. Muitas das vezes colocou-se em segundo plano a análise da estabilidade do maciço, no entanto, a necessidade de exceder limites de segurança devido à grande dimensão das estruturas a construir, levou à necessidade de caracterizações exaustivas das propriedades mecânicas do maciço. Os taludes rochosos suportam as diversas forças promovidas pelas estruturas presentes que afetam drasticamente a segurança e desempenho dos mesmos. Perante isto, para projetar e construir estruturas de engenharia com o máximo de segurança e economicamente viáveis é necessário conhecer as características e as propriedades geológicas do maciço onde esta será implantada.

Atualmente um dos grandes problemas vivenciados pela população madeirense é a instabilidade das encostas. Esta instabilidade pode levar ao surgimento de acidentes catastróficos que podem por em risco as vidas humanas. Devido a acontecimentos recentes (TVI24, 2013), quando as épocas chuvosas apresentam um índice pluviométrico mais elevado, a população fica com receio que tais situações se repitam, uma vez que, é nesses períodos que os taludes ficam mais suscetíveis a escorregamentos devido ao aumento da pressão hidrostática nos vazios do solo, reduzindo assim drasticamente a resistência do solo ao corte.

Devido à sua morfologia, a ilha da Madeira tem vindo a ser ocupada desordenadamente ao longo das suas encostas, assim como a realização de obras em áreas de risco, tornando o tema da estabilidade dos taludes um dos fatores com maior relevância neste contexto, sendo necessária a implantação de obras de contenção assim como a consciencialização da população (Oliveira, et al., 2010). A Ilha da Madeira é descrita por uma morfologia muito acidentada, assim, torna-se fundamental uma boa caracterização geológica e geotécnica para poder prever o comportamento dos maciços face às diferentes solicitações. No caso de obras de engenharia civil para implantação de vias de comunicação, as imposições do traçado obrigam, nos dias de hoje, a escavações de enormes dimensões que, com o passar do tempo podem vir a exibir problemas de instabilidade nas faces dos taludes.

Face ao exposto, a caracterização e classificação geomecânica dos taludes rochosos representa, por isso, uma mais-valia na prevenção de acidentes e na definição do tipo de intervenção mais apropriada.

Na literatura (Bell, 2007) pode-se encontrar diferentes abordagens para a obtenção das características geomecânicas e geológicas dos taludes rochosos. É de salientar a relevância que estas abordagens dão à influência dos estudos das descontinuidades para o entendimento dos mecanismos de instabilidade de um talude rochoso. Estas têm grande influência no comportamento dos taludes rochosos através dos vários parâmetros que nelas intervêm tais como, número, orientação e natureza.

Num projeto geotécnico corrente, muitas vezes, assume-se o meio como homogêneo e contínuo, devido ao pouco conhecimento sobre o comportamento dos maciços. O comportamento mecânico dos taludes pode ser condicionado tanto pelas condições gerais, são deste exemplo as propriedades do maciço, como pelas condições particulares, tais como descontinuidades presentes na massa rochosa.

A implicação de uma possível rutura pode ser pequena e local ou, pelo contrário, alcançar grandes dimensões, com consequências gravosas e penosas. Na avaliação das condições do talude rochoso deve-se empregar mais do que métodos empíricos (ábacos Hoek & Bray 1981 e Wyllie & Mah, 2004), como as classificações geomecânicas, nomeadamente os sistemas SMR - *Slope Mass Rating* (Romana M., 1993), RMR - *Rock Mass Rating* (Bieniawski Z. T., 1989) e GSI - *Geological Strength Index* (Hoek et al. 1995). No geral estas classificações consideram um conjunto de características que compõem as descontinuidades que fragmentam o maciço, tais como: o espaçamento, a abertura, a altitude, o preenchimento, a rugosidade e a persistência. Tendo por base as análises “*in situ*” pode-se descrever cada uma das características que compõem as descontinuidades, desde a resistência da rocha intacta até à reunião de um vasto leque de dados físicos necessários para se poder chegar a uma nota final de classificação.

Quando se fala de taludes rochosos, não existe nenhuma classificação ou método universalmente aceite e implementado por toda a comunidade, com vista a ser utilizado para todas estas situações. A implementação das classificações geomecânicas para a classificação de taludes rochosos é um sistema divulgado nos campos de geologia para a engenharia, tendo como principal objetivo a obtenção de um valor que represente a qualidade do talude rochoso. Após a obtenção da qualidade do talude este pode ser estudado na perspectiva de um possível tratamento de maneira a torná-lo seguro.

Os sistemas de classificação já desenvolvidos, como a classificação geomecânica RMR e GSI, têm a sua aplicação espalhada por todo o planeta, o que acaba por promover o desenvolvimento do próprio sistema de classificação. Alguns autores propuseram correlações entre os vários índices obtidos para cada uma das classificações e suas propriedades mecânicas, como Hoek & Brown (1980), Serafim & Pereira (1983), Katz et al. (2000), entre outros. A partir dos resultados das classificações pode-se determinar as propriedades mecânicas do talude, assim como utilizar estes resultados para propor uma série de procedimentos de engenharia.

As classificações de taludes rochosos são sistemas que descrevem e quantificam as diversas características do talude rochoso, em termos de índice de qualidade. Na área da geotecnia, um dos fenómenos com maior relevância é a problemática da instabilidade de taludes, o que se deve às consequências graves que podem advir, como seja a perda de vidas humanas e materiais.

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito da parceria existente entre a Universidade da Madeira e a empresa Tecnovia Madeira - Sociedade de Empreitadas S.A.. Neste âmbito, o autor teve a oportunidade de acompanhar a execução da obra de estabilização dos taludes sobranceiros à E.R. 222 no sítio da Rateira, o que se revelou de extrema importância para o enriquecimento do processo académico, quer em termos pessoais, quer em termos profissionais. No que concerne ao acompanhamento da estabilização dos taludes sobranceiros à E.R. 222, neste trabalho faz-se a descrição das técnicas utilizadas na estabilização destes taludes, situados na Ponta do Sol. Esta descrição é precedida por uma caracterização geomecânica dos taludes no estado natural e análise de estabilidade de um dos taludes.

1.2 Objetivos

O presente trabalho foi desenvolvido tendo como um dos objetivos a classificação de taludes rochosos através da aplicação dos índices RMR e GSI. Para que se possa aplicar estas classificações é conveniente estudar as características mecânicas e estruturais do maciço rochoso que, no presente trabalho, consistiu em analisar dois taludes de escavação, para a implantação da estrada regional E.R. 222.

O objetivo quando se analisa um dado local no âmbito da engenharia de maciços rochosos é conceber e estabelecer os parâmetros necessários num quadro amplo de forma a responder aos aspetos mecânicos, geométricos e construtivos bem como aos aspetos da segurança operacional de uma estrutura construída num maciço (Hoek E. , 2006).

A caracterização de um determinado local é feita através do conhecimento da formação geológica e dos afloramentos dos materiais constituintes. Quando se está a tratar de taludes rochosos, não existe nenhuma classificação mundialmente aceite e implementada por toda a comunidade, com vista a ser utilizada para todas as obras de taludes, pelo que existem varias classificações, que são utilizadas em função do projeto.

A prática de se classificar um talude rochoso pelas classificações geomecânicas RMR e GSI é um exercício frequente no meio técnico e é utilizada sobretudo para avaliar a qualidade da rocha presente no talude. O objetivo deste trabalho é aplicar estas duas classificações geomecânicas a dois taludes rochosos, tendo como finalidade compreender a confiabilidade destas classificações aplicadas a taludes, perante os conhecimentos geológicos adquiridos para definição da qualidade deste.

No geral, pode-se destacar como principal objetivo deste trabalho, alcançar os seguintes tópicos:

- ❖ A identificação e a caracterização geológica e geotécnica do talude, no que respeita a heterogeneidade litológica e estrutural bem como o grau de fracturação e de alteração do talude. Caracterização geológica e estrutural das formações geológicas que compõem o talude rochoso. Identificação das descontinuidades e levantamento dos parâmetros a elas associados, tais como o espaçamento, a rugosidade, a orientação, o preenchimento e a percolação da água;
- ❖ O levantamento e comparação dos vários métodos de classificação de taludes rochosos. Aplicação das classificações geomecânicas RMR (Rock Mass Rating) e GSI (Geological Strength Index), que podem ser utilizadas nas várias situações, para a obtenção do índice de qualidade;
- ❖ Breve descrição sobre os modos de instabilidade global dos taludes e identificação dos principais tipos de instabilidades que podem ocorrer num talude rochoso. Análise de estabilidade dos taludes, com recurso ao *software* SLIDE 6.0, com o objetivo de analisar a estabilidade e compreender a variação do fator de segurança em função dos parâmetros resistentes. Procurou-se conhecer os diferentes fatores que contribuem para a instabilidade dos taludes rochosos;
- ❖ Acompanhamento e descrição dos processos de execução de uma obra de estabilização de taludes, de forma a entender todos os mecanismos presentes neste tipo de obra.

O presente trabalho pretende produzir uma abordagem das características a aplicar para um estudo completo de classificação de taludes rochosos, dando grande relevância às características geológicas e geotécnicas para a aplicação e interpretação das classificações geomecânicas. Como objetivo principal deste trabalho expõem-se os índices RMR e GSI obtidos para cada um dos taludes estudados, assim como as técnicas utilizadas para prevenir futuras instabilidades.

1.3 Metodologia

A presente dissertação foi apoiada numa metodologia centrada na pesquisa, tratamento de bibliografia díspar e aplicação a caso de estudo. Toda a bibliografia resultou de uma pesquisa em diversos meios, dos quais se evidenciam algumas publicações de carácter específico, também foi dado

grande relevo a sítios de internet direcionados para informações particulares acerca da construção civil, dentro da temática dos taludes rochosos, especialmente em instituições públicas assim como em associações profissionais.

No que diz respeito à documentação associada à obra de estabilização do talude rochoso sobranceiro à E.R. 222 no sítio da Rateira, no conselho da Ponta de Sol, esta foi fornecida em exclusividade pela empresa Tecnovia, Sociedade de Empreitadas S.A.. É importante mencionar que, complementarmente a toda a documentação consultada, a vivência de perto na obra, bem como do diálogo informal e formal com os diferentes intervenientes envolvidos na empreitada foram de grande utilidade para o desenvolvimento deste estudo.

O estudo teve início, com a compilação de toda a bibliografia e documentação diversa. Os trabalhos de campo da presente investigação decorreram, essencialmente, durante os meses de Fevereiro a Julho de 2016, estes englobaram o trabalho de reconhecimento e inspeção visual dos taludes, das cartografias geológicas e do levantamento geológico e geotécnico.

Este trabalho foi desenvolvido em duas fases complementares, numa primeira etapa, referente ao trabalho de campo relativo à fase de reconhecimento geológico e geotécnico, já na segunda fase, enquadrada no processamento, análise e interpretação dos dados recolhidos com o intuito da caracterização de cada um dos taludes rochosos.

De seguida, mostra-se a esquematização da metodologia usada para a realização dos objetivos propostos:

- I. Pesquisa bibliográfica referente à:
 - ❖ Geologia da região em estudo;
 - ❖ Tipos de descontinuidades presentes nos taludes rochosos;
 - ❖ Tipos de classificações de taludes rochosos;
 - ❖ Tipos de roturas prováveis assim como o risco de instabilidade de taludes rochosos;
 - ❖ Prováveis soluções geotécnicas a implementar na estabilização de taludes.
- II. Trabalho de campo:
 - ❖ Medição com fita métrica do espaçamento e abertura das descontinuidades;
 - ❖ Já no que se refere a continuidade foi avaliada visualmente bem como a percolação, o preenchimento, e a rugosidade;
 - ❖ Registo fotográfico com o intuito de uma melhor interpretar do trabalho prático, bem como a descrição das soluções implementadas em obra para a estabilização do talude.
- III. Tratamento dos dados recolhidos em campo, tendo como objetivo final a classificação dos taludes rochosos.
- IV. Composição do documento final.

1.4 Estrutura

A presente dissertação reflete a metodologia seguida durante este processo, pelo que esta é composta por seis capítulos. Tendo como prioridade uma divisão capitular que demonstre a sequência lógica entre os vários temas tratados, permitindo assim um desenvolvimento estruturado e coerente da dissertação. Assim, a estrutura do trabalho é:

- ❖ Capítulo 1: É um capítulo meramente introdutório, onde pretende-se demonstrar o trabalho desenvolvido pelo autor desta dissertação de forma breve e de forma a mostrar o âmbito assim como os principais objetivos desta Dissertação de Mestrado. Neste capítulo introduz-se o tema assim como o seu enquadramento temático implícito.
- ❖ Capítulo 2: Neste capítulo procurou-se descrever o processo de caracterização geológico e geotécnico de taludes rochosos e todos os fatores que intervêm neste processo. Para uma melhor compreensão são apresentadas as propriedades físicas e mecânicas intervenientes para a caracterização de taludes rochosos nomeadamente a caracterização do maciço assim como a caracterização das descontinuidades.
- ❖ Capítulo 3: Apresenta-se as várias classificações geomecânicas de taludes rochosos, mais correntemente utilizadas, podendo estas serem utilizadas em simultâneo. Os procedimentos e métodos adotados para a classificação de taludes rochosos, nomeadamente os sistemas de classificação RMR e GSI. Também será apresentado uma breve alusão à instabilidade de maciços rochosos, com a temática da instabilidade de taludes e as suas medidas de estabilização.
- ❖ Capítulo 4: Neste capítulo será apresentado a caracterização geológica e geotécnica dos taludes rochosos, nomeadamente o enquadramento geomorfológico e a caracterização das descontinuidades. Por fim, aplicou-se as classificações geomecânicas aos dois taludes rochosos, tendo como objetivo a obtenção de um índice de qualidade;
- ❖ Capítulo 5: Com este capítulo procurou-se verificar a estabilidade do maciço através de uma análise de estabilidade, procurando potenciais superfícies de rotura que levem ao colapso. Também apresenta-se a obra que serviu de base a este trabalho, Talude Sobranceiro à ER 222, através da descrição das técnicas aplicadas na estabilização dos taludes. É efetuado um pequeno enquadramento geral da obra, fazendo referência às disposições básicas do respetivo projeto.
- ❖ Capítulo 6: Por último, neste capítulo, elaboram-se as considerações finais a todo este trabalho e à informação tratada e retirada, expondo as conclusões obtidas, sendo deixadas algumas indicações de possíveis trabalhos que poderiam ser efetuados neste campo.

2.

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA DE TALUDES ROCHOSOS

2.1 Generalidades

Durante muito tempo descorou-se a importância da análise do comportamento mecânico das rochas, o crescente desenvolvimento das obras de engenharia civil tem levado ao reconhecimento da relevância da caracterização geológica e geotécnica dos maciços. Em obras cuja implantação interfere com a estabilidade, especialmente obras subterrâneas, pontes, barragens e estradas deve dar-se especial atenção ao comportamento do maciço rochoso.

A importância das características das fundações geológicas nos projetos de estabilidade surge no fim do século XIX, sendo estes referidos no âmbito de grandes projetos de engenharia, um exemplo português é o estudo geológico que acompanhou a escavação do túnel do Rossio, em Lisboa, realizado por Paulo choffat (Oliveira R. , 2012). Sobretudo a partir de meados do século XX encarou-se com especial importância o comportamento mecânico das rochas. Pode-se afirmar que a mecânica das rochas teve grande desenvolvimento e importância nos últimos 50 anos, sendo estes conhecimentos compilados em Talobre (1957) sob o título *“La mécanique des roches appliquée aux travaux publics”*, e Müller (1963), intitulada *“Der Felsbau”* (Rocha, 1981).

A Geomecânica é uma área científica em que vários autores consideram como sendo a reunião de Mecânica das Rochas e Mecânica dos Solos (Bock, 2006). A Geologia da Engenharia surge formalmente em meados da década de 50, é nesta época que aparecem os primeiros tratados de Geologia de Engenharia. O conceito de Geotecnia como ramo da Engenharia incorpora as disciplinas de Mecânica das Rochas, Mecânica dos Solos e Geologia da Engenharia que interagem entre elas para a resolução dos problemas das obras de engenharia. A Geologia de Engenharia faz a ligação entre a Geologia e a Engenharia Civil, surgindo simultaneamente como uma das disciplinas de Geotecnia.

A Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas tem como base a aplicação dos princípios da Mecânica para a resolução dos problemas de estabilidade. A potencial instabilidade de taludes rochosos requer um trabalho de campo minucioso e uma boa análise dos dados obtidos. Já a Geologia de Engenharia estuda as características geológicas, afim de saber os parâmetros mecânicos e a sua distribuição num determinado maciço.

As características mais importantes no estudo geológico e geotécnico dos maciços são a deformabilidade, resistência ao corte, permeabilidade e o estudo da tensão *“in situ”*. Uma das primeiras etapas é elaborar um programa de estudos, sendo esses estudos geológicos e geotécnicos que possam responder de uma forma clara e económica as questões que possam vir a ser levantadas durante cada uma das fases de um projeto.

A previsão do comportamento do talude deve ser calculada em função do tipo de obra a inserir no local. Tal comportamento denomina-se por caracterização geotécnica e geológica do maciço rochoso (Oliveira & Alves de Brito, 1998). A classificação geomecânica do talude tem como base a hierarquização das características, organizando-as individualmente em classes, às quais se associa comportamentos diferentes do meio.

Neste tipo de obras deve-se começar por efetuar uma recolha da informação geológica de base, geológico-estrutural e especialmente litológica. Posteriormente deve realizar-se uma caracterização da compartimentação do talude, sendo registado as características geométricas e mecânicas das descontinuidades do talude. Uma análise da instabilidade é feita com recurso às classificações geomecânicas que auxiliam na execução de projetos em maciços rochosos, para poder aplicar este tipo de classificação é necessário saber as características e as propriedades geológico e geotécnicas do maciço.

2.2 Etapas do estudo

Numa primeira fase é fundamental a realização de uma pesquisa bibliográfica com o intuito de analisar todos os precedentes do local em estudo. Nesta primeira etapa deve também fazer-se uma rigorosa inspeção “*in situ*” com o objetivo de conhecer a existência de perigos eminentes, para que a etapa seguinte, de reconhecimento, se dê com o máximo de segurança possível.

Não se deve iniciar o estudo geológico e geotécnico de qualquer maciço, sem proceder ao seu reconhecimento, sendo esta uma das etapas do estudo geológico e geotécnico de qualquer talude intercetado por obras de engenharia civil. Como parte do reconhecimento deve entender-se elementos de natureza geológica, topográfica, geotécnica e sismológica. As informações necessárias podem ser encontradas nas Câmaras Municipais.

No que se refere as informações topográficas que habitualmente serve de suporte aos estudos geológicos e geotécnicos de obras de engenharia civil são constituídas essencialmente por: cartas topográficas, fotografias aéreas e de satélite e ortofotomapas. Os elementos geológicos, que considera-se de elevado interesse é a carta geológica do Instituto Nacional de Engenharia Tecnológica e Inovação (INETI), no que respeita a obtenção de informação de carácter geotécnico pode-se aceder ao Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC), que possui um vasto reportório de documentos.

A caracterização da compartimentação do talude rochoso é realizada na fase de reconhecimento “*in situ*”, tratando-se assim do registo das características mecânicas e geométricas das descontinuidades. Posteriormente com base nas informações, complementa-se com análises de estabilidade realizadas com recurso a modelos e métodos numéricos, escolhendo o melhor método de estabilização para as condições do maciço assim como à definição das condições hidráulicas, relativamente à drenagem do maciço (Brady & Brown, 2004).

2.3 Características das descontinuidades

Pode-se descrever a qualidade do maciço rochoso através da análise das características das descontinuidades ocorrentes nesse talude. Um dos parâmetros que mais condiciona as propriedades geotécnicas de grande parte dos taludes rochosos são as descontinuidades, estas têm um comportamento ao nível da resistência ao corte, deformabilidade e permeabilidade essencialmente diferente do material que constitui o talude.

A interrupção de qualquer entidade geológica à continuidade física de uma unidade geológica designa-se por descontinuidade ((Rocha, 1981) e (Brady & Brown, 2004)). O termo descontinuidade é utilizado para descrever grande parte das superfícies estruturais de um maciço tais como diáclases, falhas, xistosidade, estratificação, entre outras (ISRM, 1978). Segundo Priest (1993), uma descontinuidade pode ser definida como uma quebra ou fratura presente num talude rochoso, sendo relevante quantificar esta em relação à sua origem, sendo essa de origem natural ou artificial.

As descontinuidades são agrupadas por categorias, cada categoria tem propriedades similares, no que respeita às proporções e propriedades de resistência ao deslizamento. As estruturas menos resistentes de um talude são as descontinuidades, sendo estas que vão condicionar o comportamento mecânico deste, por isso as descontinuidades são tão importantes quando está-se a analisar situações de rotura (Rocha, 1981).

Para se poder compreender o comportamento do talude rochoso antes, durante e após a escavação, é fundamental caracterizar as descontinuidades e o estado de intensidade das fraturas presentes no talude (Priest & Hudson, 1976). Um sistema de classificação fiável segundo Romana (1993), tem de basear-se no comportamento geométrico dos maciços tendo por base os seguintes aspetos:

- ❖ Características globais do maciço rochoso, como a frequência das descontinuidades e as condições de percolação da água;
- ❖ Diferença entre o pendor das descontinuidades e o do talude;
- ❖ Relação entre as direções das descontinuidades e a face do talude;
- ❖ Relação entre ângulo de atrito das rochas e o pendor das descontinuidades;
- ❖ Relação entre a resistência ao corte e o ângulo de atrito das descontinuidades.

Qualquer plano de separação no maciço rochoso designa-se por descontinuidade, a sua origem pode ser tectónica, sedimentar ou diagenética. Por tectónicas entende-se falhas e diáclases, já no caso das sedimentares pode-se ter superfícies de estratificação ou de laminação, quando se está perante uma estrutura filoniana esta tem origem em diagenética.

Na Tabela 1 faz-se um resumo quanto aos diferentes tipos de descontinuidades, estes agrupam-se em singulares, quando aparecem num único plano que perfura o maciço e em sistemáticos, quando aparecem em famílias.

Tabela 1 - Classificação das discontinuidades quanto ao tipo (sistemáticas ou singulares) (adaptado de González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, (2002) e ISRM, (1978))

Descontinuidades	Sistemáticas	Singulares
Planares	Planos de laminação; Planos de estratificação; Planos de xistosidade; Diáclases e fissuras;	Falhas; Filões; Discordâncias;
Lineares	Interseção de discontinuidades planares; Lineações;	Eixos de dobras;

O material rochoso é anisotrópico, resultando assim maciços rochosos, constituídos por estruturas descontínuas e heterogêneas que compartimentam o talude. As discontinuidades, em geral, são mais importantes, não só no que diz respeito à resistência, mas também à deformabilidade dos taludes rochosos. As características principais das discontinuidades com implicação no comportamento geotécnico do talude são: o espaçamento, a rugosidade, a orientação, o enchimento, a persistência e a abertura ((Priest, 1993) e (ISRM, 1978)). As diáclases são, tipicamente estruturas planares não-penetrativas, resultando de um procedimento frágil ou semi-frágil das rochas.

As discontinuidades podem também ocorrer devido às tensões que se desenvolvem com o arrefecimento e diminuição de volume em rochas ígneas extrusivas. O desenvolvimento de diáclases é apenas o início de uma série de alterações que vão afetar as rochas, as discontinuidades vão facilitar a circulação e penetração profunda de ar e água, provocando assim uma série de alterações nas rochas.

Dependendo da sua origem, distinguem-se vários tipos de diáclases ((González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2002) e (Davis, Reynolds, & Kluth, 2011)):

- ❖ Diáclases de origem tectónica ligadas a dobramentos e a falhas;
- ❖ Diáclases formadas por contração durante ou após o dobramento do corpo ígneo.

Quando está-se na presença de rochas sedimentares, as superfícies que limitam os estratos são os planos de estratificação, sendo estas habitualmente sistemáticas e com elevada continuidade, normalmente os espaçamentos variam entre alguns centímetros até vários metros. Os planos que fazem a separação entre diferentes litologias de um talude rochoso designam-se por superfícies de contacto litológico, e tem elevada importância quando presentes em rochas ígneas, pois vão influenciar grande parte do seu comportamento mecânico.

As diáclases, do ponto de vista geotécnico, importam determinar a sua variação, assim como a amplitude da abertura. Quando está-se na presença de diáclases preenchidas, é muito importante especificar a natureza do preenchimento, em especial, a caracterização das propriedades mecânicas. Caso as diáclases não estejam preenchidas é importante, do ponto de vista geotécnico, caracterizar a sua rugosidade. O comportamento mecânico das discontinuidades dependerá se as paredes são lisas, estriadas ou polidas e se são planas, onduladas ou denteadas (ISRM, 1981).

A formação de diáclases pode ser devido a diversos mecanismos, designam-se por diáclases de tração aquelas que são devidas a tensões de tração e por diáclases de corte aquelas são originadas por

tensões de corte (González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2002). Quanto a sua origem, acredita-se que as diáclases se dividem em dois tipos principais: diáclases de corte ou de cisalhamento e diáclases de tração ou de extensão (Figura 1) ((Palmström, 1995); (Davis, Reynolds, & Kluth, 2011)).

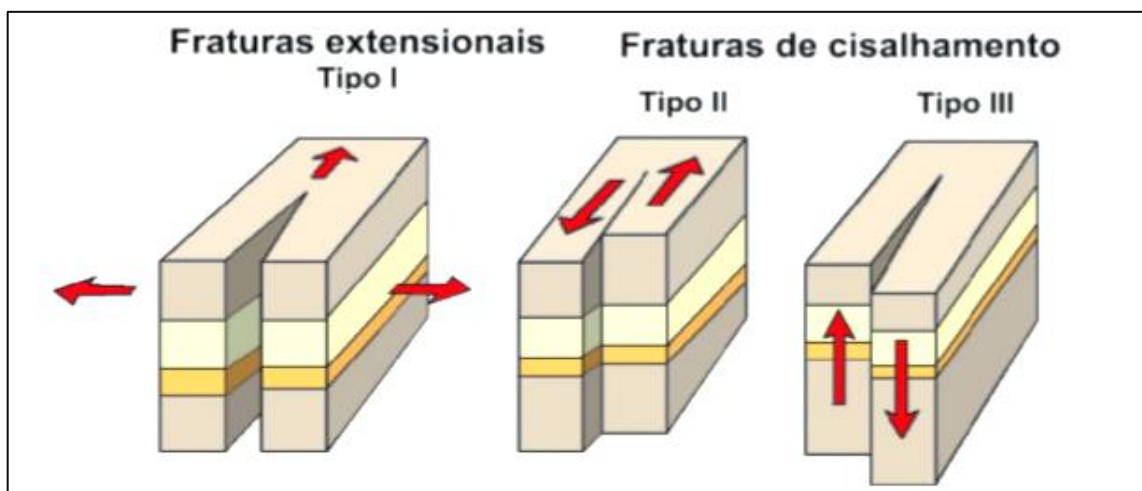


Figura 1 - Modos fundamentais de geração de estrias em diaclasamento (Salamuni). O Tipo I abertura perpendicular às paredes das superfícies de diaclases, o Tipo II deslizamento segundo uma direção paralela à superfície de deslizamento e o Tipo III movimento “em tesoura” paralelo à superfície de diaclasamento e à frente da fracturação.

Na Figura 2, ilustra-se os tipos de diáclases mais frequentes num maciço composto por rochas magmáticas, estas estarão ordenadas segundo a sua idade presumível. Os principais tipos de diáclases que podem surgir num maciço magmático são: diáclases cruzadas (possivelmente, as primeiras a formar-se), diáclases diagonais, diáclases sub-horizontais e diáclases longitudinais (possivelmente, as mais recentes). Na Tabela 2 faz-se a descrição dos principais tipos de diáclases em rochas magmáticas, bem como as características dessas mesmas fraturas, segundo a mesma ordem.

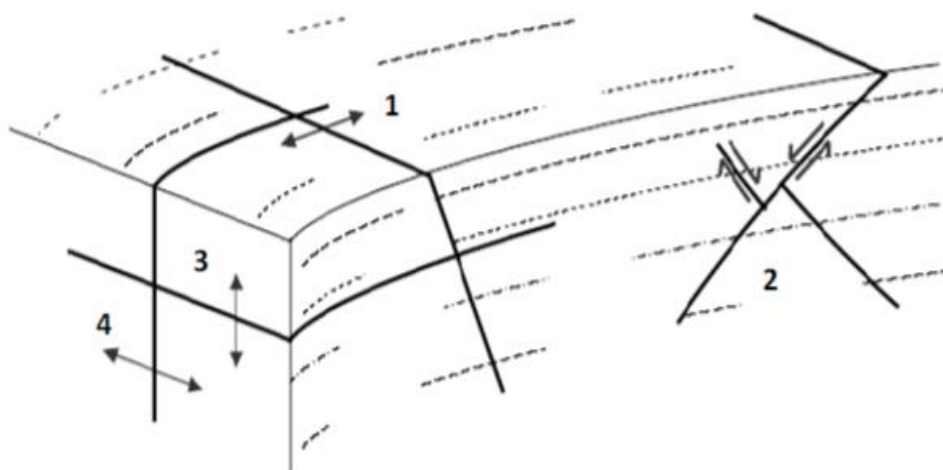


Figura 2 - Principais tipos de diáclases num maciço magmático (Borges, 2002). 1-Diáclases cruzadas; 2-Diáclases diagonais; 3-Diáclases sub-horizontais; 4-Diáclases longitudinais

Tabela 2 - Descrição dos principais tipos de diáclases em rochas magmáticas (Borges, 2002).

Designação	Orientação	Preenchimento	Mecanismo
Diáclases cruzadas	Perpendiculares às linhas de fluxo	Preenchidas; Com estrias de deslizamento;	Tração associada ao atrito entre a crosta e o magma fluido e, ainda, à possível expansão da intrusão
Diáclases diagonais	A 45 ^a , ou mais, das linhas de fluxo	Preenchidas; Com estrias de deslizamento;	Por corte associado às tensões criadas pelo fluxo: tração ao longo das linhas de fluxo; compressão, perpendicularmente
Diáclases sub-horizontais	Sub-horizontais	Preenchidas	Talvez, por tração resultante da retração da massa interna da intrusão, ao arrefecer
Diáclases longitudinais	Paralelas às linhas de fluxo	Raramente preenchidas; Quando preenchidas, contêm minerais estranhos à intrusão;	Por tração, devido a esforços gerados pelo arrefecimento, associados ou causados pela extensão lateral devida ao levantamento tectónico

Por outro lado, uma falha é uma ocorrência tectónica originada por fratura do terreno, na qual houve deslocamento relativo, maior ou menor, dos dois blocos contíguos. Este tipo de ocorrência desenvolve-se quando as tensões, presentes no talude, ultrapassam o ponto de rotura. Pode-se encontrar três tipos de tensões nas rochas, que levam à sua rotura, tensões de compressão, tração e corte. A superfície que delimita a falha designa-se por paredes de falha, já o espaço presente entre elas designa-se por caixa de falha.

O deslocamento relativo dos dois blocos apresenta, geralmente, grande continuidade ao longo do talude rochoso. Quando os blocos estão separados entre si, definindo uma caixa de falha, esta pode estar preenchida por materiais ou não, o preenchimento muitas vezes resulta do próprio esmagamento da rocha durante o movimento. Quando os blocos se deslocam, um em relação ao outro, fraturam-se em fragmentos pequenos e que, mais tarde podem ser associados por qualquer tipo de cimento, constituindo assim brechas de falha.

O que caracteriza uma falha é, essencialmente, a direção e inclinação do seu plano de falha. Como ocorre movimento na falha, dois pontos homólogos ficam afastados com uma determinada distância. Na Figura 3 pode-se observar a distância, entre dois pontos homólogos, essa distância designa-se por rejeito da falha. É habitual utilizar-se os termos rejeito horizontal e rejeito vertical, a adição vetorial destes dois rejeitos da origem ao rejeito real. O rejeito horizontal é a distância, na horizontal, que separa dois pontos homólogos, no que respeita ao rejeito vertical é a distância, vertical, que separa dois pontos homólogos.

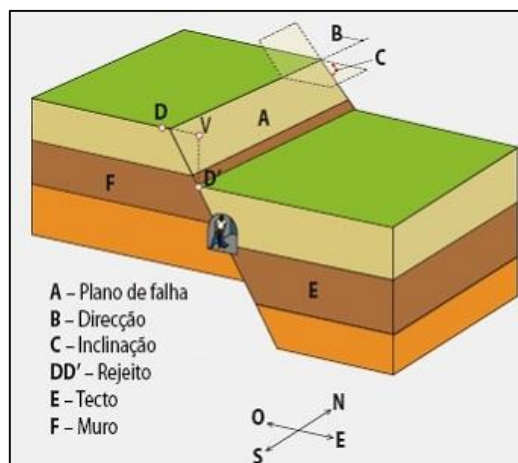


Figura 3 - Rejeito de uma falha (http://bio-geo-tudo-o-que-precisas-de-saber.blogspot.pt/2013_05_01_archive.html)

As falhas ativas apresentam, na atualidade, evidência de movimento, destas pode-se destacar a relevância das falhas de fenómenos de natureza sísmica. Pode-se destacar três tipos principais de falhas (Figura 4):

- ❖ Falhas normais (que se formam em ambientes distensivos);
- ❖ Falhas inversas (que se formam em ambientes compressivos);
- ❖ Falhas de desligamento (que se formam em ambientes de tensões tangenciais)

As falhas normais ocorrem quando existe movimento dos blocos rochosos, levando à descida do teto em relação ao muro. Resultam da atuação de forças distensivas. Nas falhas inversas ao movimento dos blocos rochosos leva a uma subida do teto em relação ao muro, resulta da atuação de forças compressivas. No que respeita a falhas de desligamento os blocos fraturados têm movimentos horizontais, paralelos à superfície de falha, resulta da atuação de forças de corte.

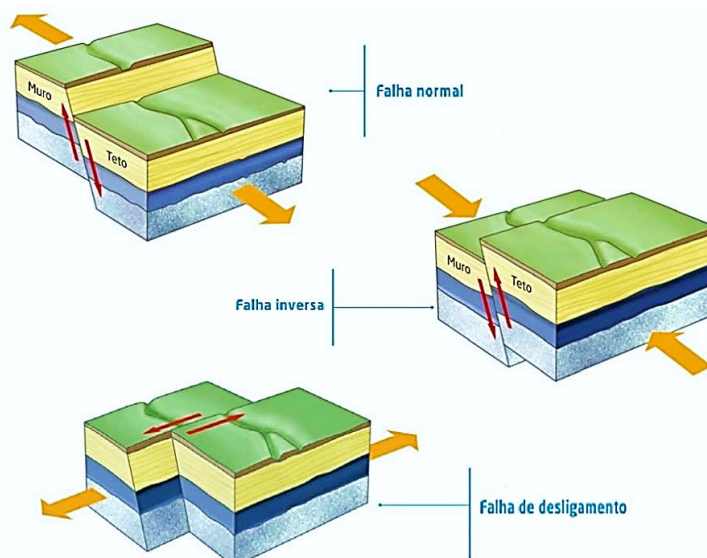


Figura 4 - Tipos de falhas (adaptado de <https://cienciasbemexplicadas.files.wordpress.com/2013/03/tipos-de-falhas.png>)

Apresenta-se de seguida um resumo dos tipos, mais frequentes, de discontinuidades que se podem observar na natureza:

❖ Diáclases:

São fraturas que dividem as rochas em blocos e em que não houve deslocamento ou o deslocamento foi mínimo ao longo da superfície de rotura. As rochas desde a sua origem estão submetidas a esforços de compressão, tração e torção que dão origem a conjuntos de faturas designadas por diáclases. Estas desenvolvem-se principalmente nas rochas duras, ocorrem em diversas direções, originando assim uma rede de fraturas que vão facilitar a separação em blocos e, portanto, a sua desagregação.

❖ Falha:

Uma falha geológica, ou falha é uma superfície de separação dos blocos rochosos, onde se observa deslocamento de grandeza significativa ao longo da superfície de separação. A dimensão da falha varia entre alguns centímetros e centenas de quilômetros, o plano de falha que é a superfície de fratura pode variar de forma ampla. Este fenómeno geológico ocorre em função da pressão aplicada por uma força.

❖ Superfície de estratificação:

Descontinuidade normalmente horizontal, paralela à superfície de decomposição dos sedimentos. A estratificação resulta da disposição característica das rochas sedimentares, em camadas sobrepostas. A disposição resulta das condições de sedimentação, a sua variação e repetição origina estratos de diversa natureza.

❖ Clivagem de fratura:

Quando se têm camadas rochosas de grande resistência, intercaladas com camadas de baixa resistência, ditas incompetentes, pode ocorrer faturas paralelas. Estas descontinuidades são conhecidas por clivagem de fratura. Por exemplo, estes tipos de descontinuidade formam-se num xisto argiloso intercalado entre camadas de arenito de resistência muito superior que, ao serem dobrados, conduzem ao surgimento de superfícies de fraturas diagonais à superfície de estratificação.

2.4 Propriedades físicas e mecânicas de taludes rochosos

2.4.1 Metodologia

Pode-se definir o maciço rochoso como um conjunto de blocos de rocha contíguos e articulados, em que o material que é composto os blocos é a matriz do maciço rochoso designado de rocha intacta, enquanto os espaços que limitam os blocos são designados de descontinuidades. Os parâmetros referentes às descontinuidades que delimitam a forma e dimensão dos blocos, que compartimentam o talude, são o desenvolvimento e o espaçamento bem como a orientação e número de famílias.

Nos estudos de engenharia geotécnica é relevante caracterizar e descrever os taludes rochosos, com o objetivo de conhecer as características e propriedades geotécnicas do maciço. Estes tipos de

trabalhos devem ser concebidos durante as primeiras etapas da investigação “*in situ*”. O objetivo dos trabalhos de campo é permitir uma avaliação do comportamento geotécnico dos taludes rochosos.

A descrição do talude rochoso implica um certo grau de subjetividade que se deve evitar, efetuando observações sistemáticas e utilizando um processo padronizado. Justifica-se, assim, a necessidade de estabelecer um método que uniformize os critérios e facilite a comunicação entre os engenheiros que tenham de realizar estudos idênticos. Nas descrições deve-se incluir os aspetos e parâmetros observados, deduzidos e medidos nas descontinuidades. Na observação do maciço deve-se ter em conta os seguintes aspetos (Ulusay & Hudson, 2007):

- ❖ Os fatores devem ser analisados sistematicamente tendo em conta a sua sequência lógica;
- ❖ A descrição do talude tem como objetivo caracterizar de uma forma precisa o maciço e permitir uma fácil leitura da informação mais relevante;
- ❖ Dar especial importância aos afloramentos, não se deve omitir nenhuma informação mesmo sendo ela básica;

Cada zona do talude deve ser caracterizada e individualizada de forma a descrever as suas propriedades intrínsecas assim como os fatores externos que condicionam o seu comportamento. Deve-se dar especial atenção à divisão em zonas mais ao menos homogêneas do talude. A caracterização global tem como objetivo definir a qualidade e resistência do talude, esta tem em conta todos os parâmetros geológicos e geotécnicos.

Uma das descrições que assume relativa importância são as descontinuidades, de seguida descreve-se, resumidamente, as etapas ((ISRM, 1981); (ISRM, 1978)):

- ❖ Enumeração das características gerais do afloramento e sua área envolvente (geomorfologia, litologia, geologia estrutural, tipo de descontinuidades, estado de alteração e textura do material);
- ❖ Divisão em zonas geotécnicas, fazendo a descrição geral de cada zona (zonas homogêneas tendo por base os seguintes parâmetros, o estado de alteração, o grau de fracturação, a resistência do material rochoso);
- ❖ Descrição pormenorizada de cada zona geotécnica;
- ❖ Enumeração dos parâmetros do talude rochoso, entre eles os geológicos e geométricos (número de famílias de descontinuidades, orientação e características);
- ❖ Classificação geomecânica e caracterização do talude rochoso.

2.4.2 Reconhecimento geológico e cartografia das superfícies do maciço

Deve-se começar por definir uma apropriada caracterização geotécnica do maciço rochoso, esta abrange a caracterização geomecânica e a caracterização geológica. A caracterização geológica inicia-se, geralmente, por um reconhecimento superficial do terreno. Os ensaios a realizar, na caracterização geomecânica, têm como intuito a caracterização da deformabilidade e da resistência do maciço rochoso (Costa e Silva, Falcão Neves, Caranhola Pereira, & Reis e Sousa, 2001).

Numa primeira fase, executa-se uma meticulosa pesquisa de toda a informação existente sobre a área a ser intervencionada. Numa fase posterior, faz-se o reconhecimento do local com o intuito de fazer uma ideia correta das características geológicas do local.

Após a execução deste estudo consegue-se representar o desenvolvimento das diversas unidades geológicas ocorrentes na zona em estudo. O estudo geral do maciço, tem por base, identificar, descrever e caracterizar os vários aspetos geológicos e geotécnicos, o estado de alteração, o estudo das discontinuidades e as condições hidrogeológicas.

As etapas para descrever as superfícies expostas do maciço, são descritas de seguida (González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2002):

- ❖ Identificação das discontinuidades (localização, situação geográfica, características geométricas, acessibilidade, extensão);
- ❖ Fotografias e esquemas de campo;
- ❖ Descrição geológica geral (caracterização das unidades geológicas, descrição e caracterização das litologias, identificação das zonas alteradas e meteorizadas, presença de água);
- ❖ Divisão em zonas e descrição geral de cada zona;

A descrição deve ser, sempre que possível, quantitativa em vez de qualitativa. As famílias de discontinuidades ocorrentes no maciço merecem uma particular atenção na descrição das características geológicas. É de grande utilidade a realização de desenhos esquemáticos das discontinuidades assim como fotografias, onde se deverá assinalar as características geológicas e geotécnicas básicas de cada zona.

As informações geológicas e geotécnicas devem ser incluídas em mapas geotécnicos, são um método que consiste em representar, cartograficamente a informação. Estes mapas permitem avaliar o comportamento, de uma determinada região, neles incluem dados sobre as características e propriedades da superfície (IAEG, 1981), (Franco, Gomes Marques, Calijuri, & Gomes, 2010)). Os aspetos gerais de maior interesse em mapas geotécnicos, na Engenharia Geotécnica são (González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2002):

- ❖ Descrição e classificação geotécnica do tipo de material constituinte do maciço;
- ❖ Propriedades mecânicas e físicas dos materiais;
- ❖ Processos geodinâmicos e geomorfológicos;
- ❖ Condições hidrogeológicas.

Os mapas geotécnicos têm a finalidade, entre outras, de incluir informações variadas sobre os materiais geológicos, dados quantitativos dos diferentes componentes do meio geológico, dados geomorfológicos e hidrogeológicos e informações explicativas para sua aplicação geotécnica.

Os mapas servem, independentemente do tipo, para incluir uma grande variedade de informações básicas, tais como (IAEG, 1981):

- ❖ Distribuição e descrição litológica das unidades geológicas;
- ❖ Descontinuidades e dados geológicos e geotécnicos;

- ❖ Topografia e toponímia;
- ❖ Propriedades das rochas;
- ❖ Classificação geotécnica das rochas;
- ❖ Condições geomorfológicas;
- ❖ Condições hidrogeológicas;
- ❖ Riscos geológicos;

2.4.3 Caracterização do maciço rochoso

Uma rigorosa caracterização geotécnica do maciço rochoso compreende a caracterização geomecânica e a caracterização geológica e, em alguns casos, é conveniente recorrer-se à caracterização geofísica. Geralmente inicia-se o processo pela caracterização geológica através do reconhecimento superficial e pela implantação dos locais onde pretende-se executar furos de sondagem (caso seja necessário). No que se refere a caracterização geomecânica do maciço é realizada mediante ensaios em laboratório e ensaios no campo. Pode-se definir a cartografia geológica como a compilação da informação geológica e geotécnica em profundidade.

Pode-se definir o maciço rochoso como uma entidade constituída por duas parcelas, material-rocha e descontinuidades que o compartimentam, é-se levado a pensar, que o material-rocha é um meio sólido contínuo, isótropo, homogéneo e elástico, situações que raramente ocorrem nos materiais rochosos. O sistema de compartimentação do maciço poderá ter grande preponderância na sua instabilidade, por isso é conveniente conhecer os principais parâmetros da compartimentação. O estudo do comportamento mecânico do maciço rochoso é iniciado pela análise das propriedades, tanto das descontinuidades como da matriz rochosa.

A caracterização global do maciço rochoso é feita a partir de dados, tais como, matriz-rocha e descontinuidades, devem ser tidos em conta outros aspetos representativos do conjunto, são eles: o número e orientação das famílias de descontinuidades, tamanho dos blocos e intensidade da fracturação e o grau de alteração.

2.4.3.1 Número e orientação das descontinuidades

O número de famílias de descontinuidades assim como o espaçamento de cada família é um dos parâmetros mais utilizados para descrever a intensidade do estado de fracturação e o tamanho dos blocos, que constituem a matriz rochosa. Cada família de descontinuidades é caracterizada pela sua orientação no espaço, características dos planos estruturais e pelas suas propriedades.

Uma das formas de classificar o maciço é pelo número de famílias, pode-se encontrar no maciço apenas uma família de descontinuidades ou maciços com três ou mais famílias de descontinuidades (Tabela 3) (ISRM, 1981). Pode-se representar graficamente as famílias de descontinuidades através da construção de blocos-diagramas, estes permitem uma visualização espacial da orientação relativa e da forma e tamanho dos blocos de matriz rocha (Figura 5).

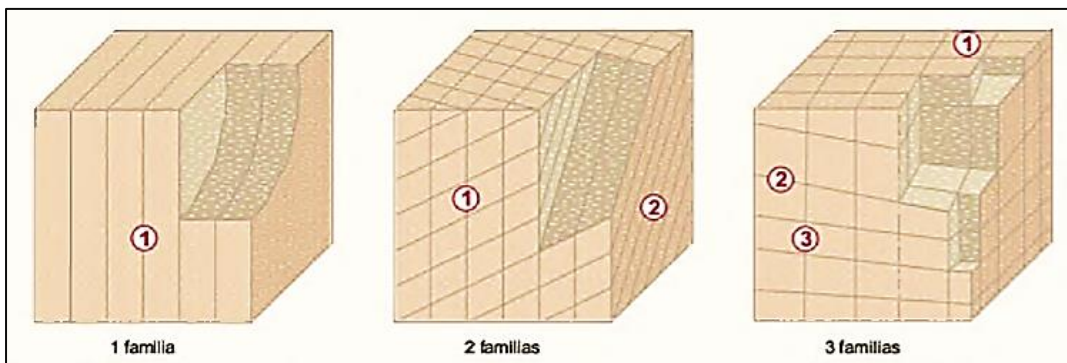


Figura 5 - Representação do número de famílias num bloco-diagrama (González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2002)

Tabela 3 - Classificação de maciços rochosos quanto ao número de famílias de descontinuidades (Adaptado de ISRM, 1981)

Tipo de maciço rochoso	Número de famílias
I	Maciço compacto, com algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
II	Uma família de descontinuidades.
III	Uma família de descontinuidades e ainda algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
IV	Duas famílias de descontinuidades.
V	Duas famílias de descontinuidades e ainda algumas descontinuidades ocasionais dispostas aleatoriamente.
VI	Três famílias de descontinuidades.
VII	Três famílias de descontinuidades e ainda algumas descontinuidades ocasionadas dispostas aleatoriamente.
VIII	Quatro ou mais famílias de descontinuidades.
IX	Maciço de rocha esmagada, com o especto idêntico ao de um solo.

2.4.3.2 Tamanho dos blocos

Um dos parâmetros mais críticos e importantes, quando se está a analisar um maciço rochoso, é o tamanho do bloco unitário, em muitos casos, torna-se um parâmetro difícil de quantificar. A determinação deste parâmetro resulta do produto de três parâmetros geotécnicos simples: o espaçamento real (é o espaço presente entre diáclases da mesma família), a orientação dos sistemas de descontinuidades e a persistência. Dos parâmetros, anteriormente descritos, o espaçamento e a orientação são mais fáceis de quantificar ((Rocha, 1981); (Gonçalves J. A., 2013)).

Na determinação destes parâmetros resulta duas situações possíveis: i) o aglomerado rochoso não possui fracturação que possibilite o aparecimento dos blocos; ii) em alternativa verifica-se o aparecimento de famílias de descontinuidades que conseguem delimitar um bloco unitário.

O comportamento do maciço vai ser condicionado, essencialmente, pelo tamanho dos blocos e pelas suas propriedades resistentes e deformações. A dimensão e forma dos blocos unitários serão definidas a partir do número de descontinuidades de cada uma das famílias, do seu espaçamento e da sua orientação, estes podem ter a aparência de cubos, prismas, paralelepípedos, romboedros, etc.. Porém as formas geométricas regulares são mais a exceção do que a regra, já que as descontinuidades de uma família raramente são paralelas de um modo consistente.

Da combinação da resistência ao corte inter-blocos e da dimensão dos blocos, advém o comportamento mecânico do maciço rochoso. O tamanho dos blocos, que compõem um maciço rochoso, pode ser determinado através de um parâmetro J_v , que representa o número de descontinuidades que intercetam uma unidade de volume ($1m^3$) do maciço rochoso. O valor de J_v determina-se mediante a contagem de descontinuidades, de cada família, que intercetam um determinado comprimento, estas são medidas perpendicularmente à direção de cada uma das famílias (ISRM, 1978):

$$J_v = \sum \frac{n.º \text{ descontinuidades}}{\text{comprimento medido}}$$

Equação 1 - Índice de afloramento volumétrico

O comprimento vai depender do espaçamento de cada família. Em alternativa pode-se optar por uma forma mais rápida, apesar de ser menos exata, em que o valor de J_v é estimado através do número total de descontinuidades que intercetam um determinado comprimento L, este valor representa uma frequência, λ :

$$\lambda = \frac{\text{número de descontinuidades}}{L (m)}$$

Equação 2 - Frequência de descontinuidades

Ou

$$\lambda = \frac{1}{\text{espaçamento médio entre descontinuidades (m)}}$$

Equação 3 - Frequência total de descontinuidades

Pode-se relacionar o valor de J_v com o tamanho dos blocos que compõem o maciço rochoso, na Tabela 4 demonstra-se essa relação. Se o valor de J_v for superior a 60 tem-se um maciço esmagado.

Tabela 4 - Classificação do tamanho dos blocos rochosos com base no índice volumétrico (Adaptado de ISRM, 1981)

Descrição	J_v (descontinuidade/ m^3)
Blocos muito grandes	<1
Blocos grandes	1-3
Blocos médios	3-10
Blocos pequenos	10-30
Blocos muito pequenos	>30

Na presença de maciços rochosos compostos por blocos de grandes extensões tendem a ser menos deformáveis. No caso dos taludes, pode-se ter modos de rotura próximos dos registados com as formações terrosas, quando se tem blocos com dimensões pequenas, isto é, rotacionais ou circulares.

Na Tabela 5 apresenta-se a classificação do maciço rochoso em função da intensidade de fracturação e da forma e tamanho dos blocos. A partir da observação do maciço rochoso pode-se classificar quanto ao tipo, esta classificação tem por base o número de descontinuidades presentes no maciço.

Tabela 5 - Classificação de maciços rochosos em função do tamanho e forma dos blocos (Adaptado de ISRM, 1981)

Classe	Tipo	Descrição
I	Compacto	Poucas descontinuidades ou espaçamento muito largo
II	Cúbico	Blocos aproximadamente equidistantes
III	Tabular	Blocos com uma dimensão (geralmente segundo a horizontal) bastante menor que as outras duas direções
IV	Colunar	Blocos com uma dimensão (geralmente segundo a vertical) bastante maior que as outras duas direções
V	Irregular	Grandes alterações do tamanho e forma dos blocos
VI	Esmagado	Blocos com dimensões bastantes pequenas

2.4.3.3 Grau de decomposição

A avaliação do grau de meteorização do maciço rochoso realiza-se através da análise direta do afloramento e comparação com os índices presentes na Tabela 14. O grau de fracturação do maciço vai estar compreendido entre cinco classes (W1, W2, W3, W4, W5), desde a W1 em que está-se perante um maciço são até ao W5 em que o maciço se encontra decomposto. Na análise do estado da matriz rocha dever-se-á fragmentar um pedaço de rocha, com o intuito de observar a meteorização.

2.4.3.4 Estado de fracturação

As condições e o número de fraturas afetam sobretudo os materiais geológicos que compõem o maciço rochoso. Estas condições incluem, principalmente, o espaçamento, a densidade de fracturação e as condições das descontinuidades, dependente da orientação ou classe. Na fracturação inclui-se todos os planos de descontinuidade que afetam o maciço (Ferrer & Vallejo, 2007).

Pode-se definir a intensidade de fracturação como a abertura entre descontinuidades. O grau de fracturação do maciço exprime-se a partir do índice RQD, (ver 3.3.2.1). Apesar da sua utilidade, este índice não tem em conta alguns aspetos como a orientação, o preenchimento, o espaçamento e as condições das descontinuidades, logo não é suficiente para descrever as particularidades da fracturação.

2.4.4 Caracterização das descontinuidades

A instabilidade do talude está relacionada com as relações geométricas entre as descontinuidades do talude rochoso, a orientação e a inclinação das mesmas. Assim, torna-se essencial a avaliação da

estabilidade do talude e da resistência ao corte, através da descontinuidade mais fraca (Singh & Goel, 1999).

Descreve-se descontinuidade como a separação entre blocos rochosos, com a tensão nula ou quase nula no que respeita à resistência à tração, sendo este o plano de fraqueza (Bell, 2007). A instabilidade dos taludes deve-se, sobretudo, às características das famílias das descontinuidades. Na presença de taludes rochosos fraturados, o aspeto mais relevante é a determinação da resistência ao corte nas descontinuidades, para tal, é de grande importância definir as propriedades e características dos planos de descontinuidades (Grossmam, 1996).

A descrição das diferentes famílias de descontinuidades é muito importante, porque regula a deformabilidade do talude, a resistência e a permeabilidade, desta forma é necessário compreender as propriedades geométricas, hidrológicas e mecânicas dos taludes rochosos. Segundo Priest (1994), Wyllie & Mah (2004) e ISRM (1978) as principais características das descontinuidades com envolvimento no comportamento geotécnico dos taludes fraturados, são:

- ❖ Atitude geológica (direção/inclinação);
- ❖ Espaçamento e espessura das camadas;
- ❖ Continuidade ou persistência;
- ❖ Rugosidade;
- ❖ Resistência das paredes das descontinuidades;
- ❖ Abertura;
- ❖ Material de preenchimento;
- ❖ Estado de alteração;
- ❖ Percolação da água;

Os parâmetros descritos anteriormente servem para descrever as diferentes famílias de descontinuidades num talude rochoso, alguns destes parâmetros, como a abertura, a rugosidade e o enchimento, demarcam o comportamento mecânico e a resistência dos planos de descontinuidades, a sua medição e descrição deve ser realizada, em regra, no campo.

2.4.4.1 Atitude geológica (direção/inclinação)

A estimativa da atitude das descontinuidades é essencialmente definida por dois parâmetros: a direção e a inclinação. Para a determinação da atitude deve utilizar-se, normalmente, uma bússola com um inclinómetro (Ferrer & Vallejo, 2007). A estimativa da atitude das descontinuidades permite identificar descontinuidades singulares ou famílias de descontinuidades presentes no talude.

O cálculo da direção e inclinação das descontinuidades pode ser conseguida através de alguns métodos, entre eles a determinação a partir de amostras de furos de sondagens, outro método mais expedito é a medição, na face do talude, da orientação através de uma bússola com inclinómetro.

A atitude de uma descontinuidade (Figura 6) é definida: pela inclinação que corresponde ao ângulo formado pela linha de maior declive do plano de descontinuidade e a horizontal (0 a 90°), e pela

direção que corresponde ao ângulo que a descontinuidade faz em relação ao Norte (0 a 360°). Se o talude apresentar um grande número de descontinuidades devido á compartimentação geral do maciço rochoso, recorre-se à análise estatística das atitudes medidas.

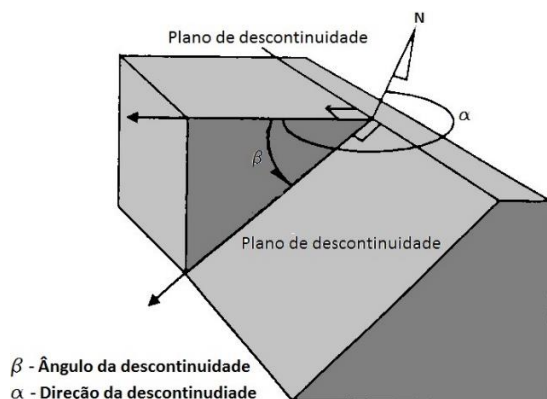


Figura 6 - Orientação de uma descontinuidade (Adaptado de <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABkBOAB/apostila-mecanica-das-rochas?part=2>)

Na análise de um talude rochoso é conveniente medir um número suficiente de descontinuidades para poder definir para cada família a quantidade de medições. Está dependerá do tamanho da zona em estudo, dos detalhes em análise e da aleatoriedade das orientações. Uma família de descontinuidades é composta pelo conjunto de todas as descontinuidades que apresentem semelhante orientação (Rocha, 1981).

A distribuição das descontinuidades num talude apresenta diversos conjuntos de descontinuidades com orientações distintas, pode-se assim recorrer ao auxílio de redes de projeção estereográfica para agrupar as descontinuidades em famílias (ISRM, 1978). Tem-se diversos métodos para representar graficamente as coordenadas das descontinuidades, pode representar-se através de diagrama de roseta, projeção hemisférica e representação tridimensional.

Os diagramas de rosetas permitem uma visão geral das principais famílias assim como a sua representação (Figura 7). O método da roseta é a representação gráfica da orientação das descontinuidades, é um método gráfico de acessível execução. A representação é feita numa base circular dividida de 0° a 360°, normalmente em sectores de 10°, análogos às direções das descontinuidades e em que o comprimento do respetivo sector, medido a partir do centro do círculo corresponde ao número de medições para cada família.

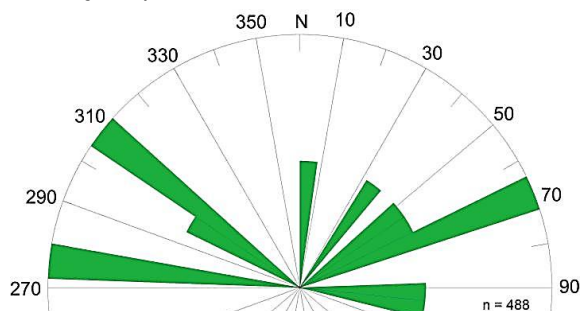


Figura 7 - Representação das famílias principais no diagrama de rosetas (Adaptado de https://www.researchgate.net/figure/281749198_fig4_Figura-10-Diagrama-de-roseta-com-as-direcoes-das-fraturas-de-extensao-analisadas-na)

2.4.4.2 Espaçamento e espessura das camadas

O estado de fracturação de um talude rochoso pode ser definido como o espaçamento, basicamente, refere-se a distância medida na perpendicular entre planos de descontinuidade que pertençam a mesma família. Já a espessura das camadas, é o intervalo entre a base e o topo das camadas.

Segundo Priest & Hudson (1976), o espaçamento pode ser determinado como o número de descontinuidades por metro, normalmente, refere-se à média de um grupo de descontinuidades, este parâmetro vai condicionar o tamanho dos blocos individuais de rocha intacta, afetando o comportamento do talude rochoso (Ferrer & Vallejo, 2007).

O espaçamento entre descontinuidades vai condicionar fortemente o comportamento geomecânico dos taludes rochosos, particularmente, no caso das diáclases. Alguns desses condicionamentos são:

- ❖ O tamanho próprio dos blocos de rocha intacta, quanto maior for o grau de fracturação mais o comportamento se aproxima do evidenciado por materiais de natureza granular;
- ❖ Em alguns casos excepcionais, um espaçamento estreito pode levar a uma modificação do tipo de rotura da massa rochosa, passando de uma rotura planar para uma rotura circular;
- ❖ A importância do espaçamento aumenta sempre que outras condições para a deformação estiverem presentes;
- ❖ A permeabilidade do talude e as características de percolação vão ser fortemente influenciadas pelo espaçamento individual das descontinuidades, assim como a associação de várias famílias de descontinuidades (ISRM, 1981) e (Ferrer & Vallejo, 2007).

Quando pretende-se determinar o tamanho dos blocos em que o talude se encontra dividido recorre-se a medição do espaçamento entre descontinuidades, este parâmetro está relacionado com a estabilidade ((Giani, 1992); (Eberhardt, 2003)).

Segundo alguns autores, ISRM (1981) e Brady & Brown (2004), a medição do espaçamento entre descontinuidades deve ser executada através de uma fita graduada, este deve ser registado ao longo de uma distância representativa da frequência das descontinuidades. O espaçamento entre descontinuidades da mesma família (Figura 8), deve ser medido segundo as recomendações propostas pela ISRM (1981), para uma correta avaliação.

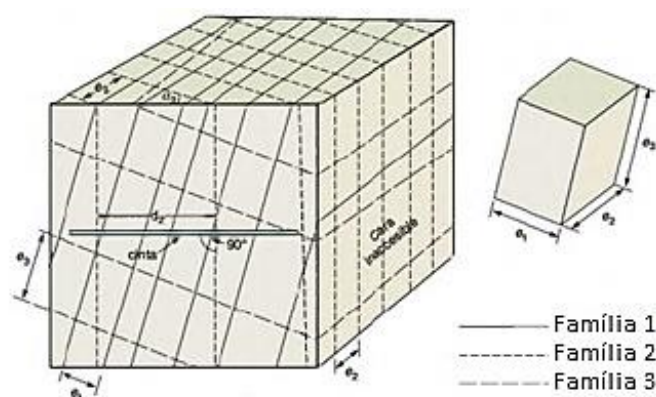


Figura 8 - Medição do espaçamento das descontinuidades (Adaptado de González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2002)

A terminologia para caracterizar o talude rochoso tendo em conta o espaçamento das descontinuidades, foi proposto pela ISRM (1978, 1981), na Tabela 6 descreve-se essa terminologia.

Tabela 6 - Classificação do espaçamento das descontinuidades segundo a ISRM (adaptado de ISRM, 1978 e 1981)

Espaçamento (cm)	Símbolo		Designação	
> 200	F1	F ₁₋₂	Muito afastadas	Afastadas
60 – 200	F2		Afastadas	
20 – 60	F3	F ₃	Medianamente afastadas	Medianamente afastadas
6 – 20	F4	F ₄₋₅	Próximas	Próximas
< 6	F5		Muito próximas	

Foram adotados valores idênticos para as fronteiras dos vários grupos da espessura das camadas, a designação foi proposta pela ISRM e encontra-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação da espessura das camadas segundo a ISRM (adaptado de ISRM, 1978 e 1981)

Espessura (cm)	Símbolo	Designação
> 200	L1	Muito espessas
60 – 200	L2	Espessas
20 – 60	L3	Moderadamente espessa
6 – 20	L4	Delgadas
< 6	L5	Muito delgadas

2.4.4.3 Continuidade ou persistência

A continuidade é definida como a extensão em área de uma descontinuidade, é um dos parâmetros que tem maior influência, quando pretende-se compreender o comportamento do talude rochoso, sendo também um dos mais difíceis de determinar. Devido ao prolongamento das descontinuidades para o interior do talude, a persistência é muito difícil de caracterizar.

A persistência vai condicionar a estabilidade do talude, afetando as definições das extensões do material rochoso que condiciona os processos de instabilidade, levando a uma alteração dos valores da permeabilidade do talude (Simons, Menzies, & Matthews). As descontinuidades com maior extensão devem merecer um estudo mais minucioso, isto deve-se ao facto de serem estas que delimitam os principais planos de rotura do talude (González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2002).

Como a persistência é um dos parâmetros de maior dificuldade, são utilizadas representações gráficas, sendo a representação mais comum através de blocos-diagrama. A ISRM (1981) expõe como solução a representação gráfica de blocos-diagrama para compreender a importância das várias famílias de descontinuidades, sendo assim possível efetuar uma classificação para as diferentes famílias (Figura

9). Através desta representação consegue-se perceber que as descontinuidades de uma dada família são mais amplas que as de outras.

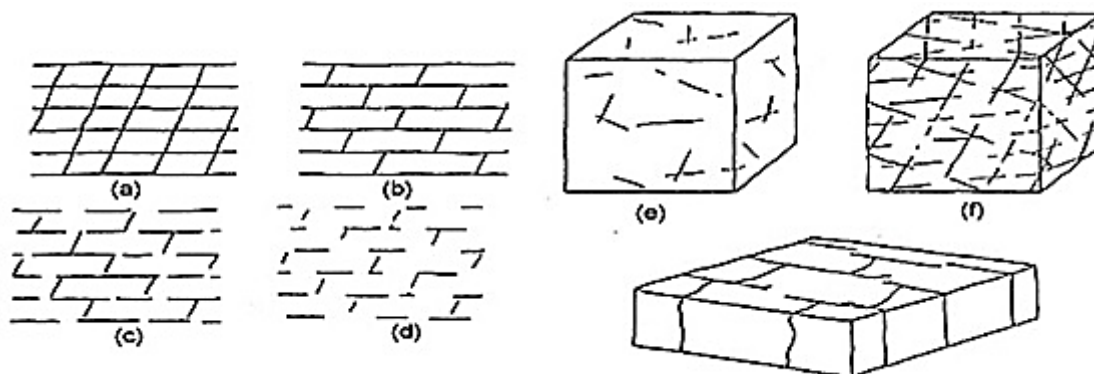


Figura 9 - Representação simples e blocos-diagrama esquemática (adaptado de Rock, 1987)

Para a medição da continuidade de uma descontinuidade utiliza-se uma fita graduada. É preciso dar especial atenção às famílias mais extensas. A quantificação da persistência poderá fazer-se mediante a medição do comprimento do trecho da superfície das descontinuidades nas superfícies expostas do talude. A ISRM (1978, 1981) definiu persistência como o comprimento das interações da família de descontinuidades em estudo, numa superfície visível e estabeleceu cinco classes (Tabela 8).

Tabela 8 - Descrição da continuidade das descontinuidades (adaptado de ISRM, 1978 e 1981)

Distância (m)	Continuidade
< 1	Muito pouco contínuas
1 – 3	Baixa continuidade
3 – 10	Continuidade média
10 – 20	Continuidade alta
> 20	Continuidade muito alta

2.4.4.4 Rugosidade

As superfícies de descontinuidade, normalmente, apresentam irregularidades e ondulações, que condicionam o comportamento de resistência tangencial. A rugosidade presente nas superfícies das descontinuidades condiciona de um modo decisivo, a resistência ao corte das mesmas, a influência na resistência ao corte das descontinuidades diminui com o alargamento da abertura e/ou do enchimento (Ferrer & Vallejo, 2007).

A direção do movimento que pode ocorrer na extensão da superfície da descontinuidade é influenciada pela ondulação presente na superfície da descontinuidade. Pode-se definir a rugosidade como as irregularidades presentes na superfície das descontinuidades, estas são relacionadas com o atrito entre as paredes das descontinuidades. A rugosidade é também responsável pela resistência ao deslizamento de uma descontinuidade, principalmente quando esta encontra-se fechada.

A rugosidade pode ser determinada através de diversos métodos dependendo da exatidão requerida, da acessibilidade da descontinuidade e da escala de medida (Ferrer & Vallejo, 2007). A estimativa da rugosidade das descontinuidades pode ser estimada através de comparação visual destas com perfis padrão de rugosidade (ISRM, 1978).

Estes perfis têm por base a classificação das paredes das descontinuidades em planares, onduladas e dentadas e, a uma menor escala, em lisas, rugosas e polidas, sendo esta última utilizada quando houver marcas claras de deslizamentos prévios. Segundo a ISRM (1978, 1981) considera-se a combinação de todas estas classificações, ficando-se com nove combinações possíveis para a classificação da rugosidade, encontra-se a classificação descrita na Tabela 9 e Figura 10.

Tabela 9 - Classificação da rugosidade das descontinuidades (adaptado de ISRM, 1978 e 1981)

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

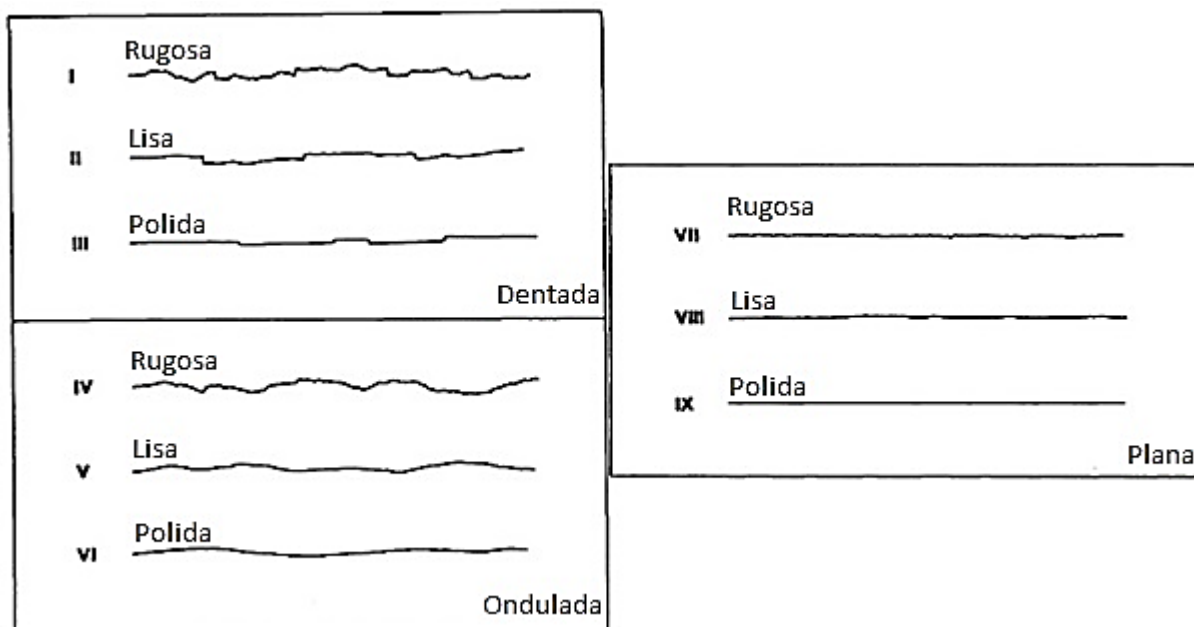


Figura 10 - Perfis de rugosidade, o comprimento dos perfis está entre 1 e 10 metros (adaptado de ISRM, 1978)

2.4.4.5 Resistência das paredes das discontinuidades

As particularidades das paredes dos blocos de material-rocha contíguas à descontinuidade são outro dos aspetos a ter em conta, estes vão condicionar a resistência e as características de condutividade hidráulica. A resistência das paredes das descontinuidades é uma componente muito relevante quando pretende-se conhecer a deformabilidade e a resistência ao corte.

Para a obtenção deste parâmetro, recorre-se a uma definição da resistência conseguida por meio de correlações com outras propriedades, assim é normal analisar o estado de alteração, a dureza através do esclerómetro portátil (martelo de Schmidt) ou apenas por resposta ao toque com o martelo de Geólogo. A terminologia proposta pela ISRM (1978 e 1981) para qualificar as paredes do material-rocha que limitam a descontinuidade está descrita na Tabela 10.

Tabela 10 - Terminologia para caracterização do estado de resistência

Grau	Descrição	Características	Resistência à compressão uniaxial aproximada (MPa)
S ₀	Rocha muito branda	Marca pela unha do polegar	0,25 - 10
S ₁	Rocha branda (I)	Fragmentada com pancadas firmes percutidas com a ponta do martelo de Geólogo. Pode ser cortada em fatias com um canivete.	1 - 5
S ₂	Rocha branda (II)	Pode ser cortada em fatias com um canivete com dificuldade. Marcas superficiais obtidas com a ponta do martelo de Geólogo.	5 - 25
S ₃	Rocha razoavelmente resistente	Não pode ser esmigalhada ou cortada em fatias com canivete. Podem-se obter fragmentos de rocha com uma pancada seca do martelo de geólogo.	25 - 50
S ₄	Rocha resistente	Podem-se obter fragmentos dando mais de uma pancada seca com o martelo de Geólogo.	50 - 100
S ₅	Rocha muito resistente	Para se obterem fragmentos são necessárias muitas pancadas com o martelo de Geólogo.	100 - 250
S ₆	Rocha extremamente resistente	Apenas se obtêm lascas percutindo com o martelo de Geólogo.	> 250

Um dos parâmetros com maior relevância na execução desta análise é a meteorização, que geralmente afeta mais as paredes das descontinuidades do que o interior da massa rochosa. Desta forma pode-se verificar a necessidade de avaliar o grau de alteração do talude rochoso como também do material-

rocha que constitui as paredes das discontinuidades. Pode-se descrever o grau de alteração meteórica do material e das discontinuidades através da Tabela 11, presente no ISRM.

Tabela 11 - Descrição do grau de alteração meteórica (adaptado de ISRM, 1978 e ISRM, 1981)

Termo	Descrição
Fresca ou sã	Não se observa sinais de meteorização na matriz rocha.
Descolorada	Observam-se mudanças na coloração da matriz rocha.
Desintegrada	A rocha é friável, apesar dos grãos minerais não estarem decompostos, mantendo-se a petrofábrica original.
Decomposta	A maioria dos minerais estão decompostos e não se reconhece a petrofábrica original.

2.4.4.6 Abertura

Pode-se definir abertura como a distância medida na perpendicular, que separa paredes adjacentes de uma discontinuidade, esse espaço pode ser preenchido por ar, água ou materiais diversos (Figura 11) (ISRM, 1978).

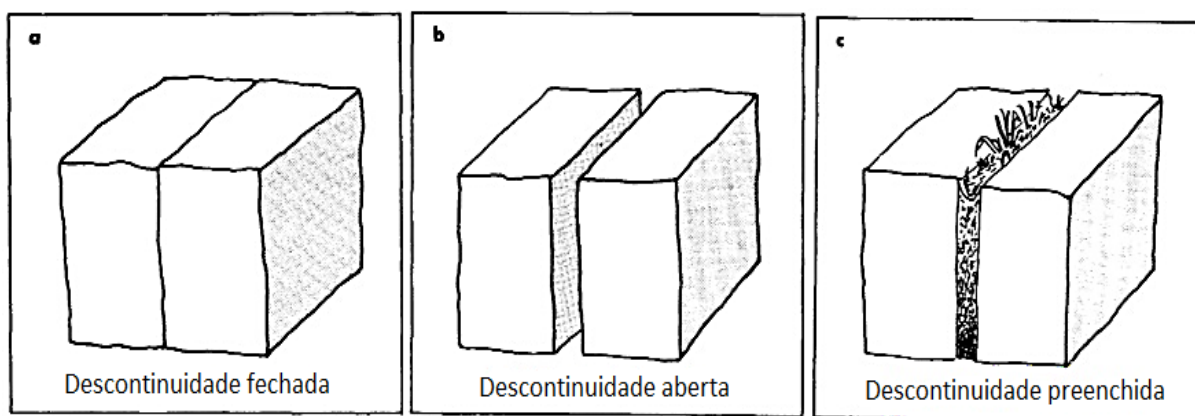


Figura 11 - Ilustração de aberturas das discontinuidades (adaptado de ISRM, 1978)

A abertura das discontinuidades diferenciar-se-á em função das distintas zonas do talude rochoso, eventualmente pode-se encontrar uma discontinuidade que apresente abertura de alguns centímetros à superfície e em profundidade estar completamente fechada (Ferrer & Vallejo, 2007). Como justificação para esta diferença pode-se admitir, a descompressão do maciço rochosos, o estado de meteorização e a existência de fenómenos de dissolução e de lavagens de fraturas (Andrade, 2004).

Segundo a ISRM (1978, 1981), os taludes devem ser classificados de acordo com a Tabela 12, cada família deve ser estudada individualmente e determinada pela média de aberturas, a medição da abertura é feita diretamente com régua graduada (em milímetros).

Tabela 12 - Classificação da abertura das descontinuidades (adaptado de ISRM, 1978 e 1981)

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

A abertura tem grande influência na resistência ao corte das descontinuidades, pois altera as tensões efetivas que atuam nas paredes das descontinuidades. A abertura de uma descontinuidade nem sempre coincide com a sua abertura original, podendo ser alterada em fases posteriores à sua formação, como acontece no processo de erosão (Maia J. A., 2003). A abertura é um dos parâmetros que tem uma influência determinante para a condutividade hidráulica dos taludes rochosos.

2.4.4.7 Material de preenchimento

O preenchimento ou enchimento de uma descontinuidade é o termo utilizado para descrever o material que enche total ou parcialmente o espaço entre as paredes da descontinuidade, esse preenchimento pode definir-se como uma camada de reduzida resistência, que usualmente é mais fraca que a rocha de origem (Giani, 1992). Pode-se encontrar descontinuidades preenchidas com materiais brandos, argilosos, ou mais resistentes, como quartzo ou calcite, que apresentam uma natureza distinta das paredes da descontinuidade.

O enchimento bem como a rugosidade são parâmetros que determinam o comportamento mecânico da descontinuidade. Nas propriedades físicas e mecânicas de enchimento incluem-se a resistência ao corte, a deformabilidade e a permeabilidade, estes parâmetros são muito variáveis, e vão controlar o comportamento da descontinuidade. A espessura e características do material de enchimento regulam o comportamento das descontinuidades, bem como da sua condutividade hidráulica.

As descontinuidades com enchimento podem surgir de duas situações: o material de enchimento, ou é posterior à formação das mesmas, ou é contemporâneo da formação das descontinuidades (Pereira, 1985).

A ISRM (1978 e 1981) apresenta como proposta para caracterizar o enchimento a seguinte metodologia:

- ❖ A grossura do enchimento deve ser medida diretamente com régua graduada;

- ❖ Na descrição do enchimento incluem-se a identificação do material, tamanho do grão e descrição mineralógica;
- ❖ A resistência é estimada mediante os índices de campo (aproximação da resistência à compressão simples a partir da Tabela 10);
- ❖ Outro dos parâmetros a registrar é o grau de humidade, bem como a estimativa qualitativa da permeabilidade do enchimento.

Para a classificação do material existente nas descontinuidades utilizou-se a classificação proposta por Bieniawski (1989) e descrita na Tabela 13.

Tabela 13 - Descrição do enchimento (adotado de Bieniawski Z. T., 1989)

Parâmetro	Descrição
Enchimento	Resistente com espessura < 5mm
	Resistente com espessura > 5mm
	Mole com espessura < 5mm
	Mole com espessura > 5mm

2.4.4.8 Estado de meteorização

Quando se fala em qualidade do talude rochoso está-se fundamentalmente a analisar o seu estado de alteração. A alteração ou meteorização de uma rocha compreende a sua decomposição e desagregação levada a cabo por agentes químicos naturais e físicos, que vão transformar essa rocha noutro produto natural (Aires-Barros, 1991).

A decisão do estado de meteorização de um talude rochoso é um fator a considerar. Este aspeto é muitas vezes determinado de forma quantitativa através da medição de parâmetros como a resistência da rocha, a velocidade de difusão de ultrassons entre outros.

A meteorização em taludes rochosos inicia-se nas paredes das descontinuidades e propaga-se em profundidade nas rochas por efeito do ar atmosférico e da água de percolação. Pode-se definir o estado de alteração através da maior ou menor dificuldade com que se fragmenta o material (rocha), pode-se utilizar métodos expeditos de observação, usando um martelo de mão, ou por outro lado analisando a sua coloração e brilho que vão alterar como resultado da alteração química sofrida por certos minerais. Para esta caracterização deve-se ter em conta alguns aspetos macroscópicos, tais como:

- ❖ Descoloração ou oxidação (alteração da cor original das rochas e minerais);
- ❖ Presença de minerais secundários (óxidos, argilas, carbonatos);
- ❖ Lixiviação do cimento original;
- ❖ Perda de imbricamento dos grãos ou coesão;
- ❖ Aumento do microfissuramento e porosidade;
- ❖ Redução do brilho e dureza dos minerais.

O número de categorias a considerar em relação ao estado de alteração de um talude rochoso varia forçosamente com o tipo de problema e, necessariamente com a pormenorização da informação respetiva. O fator que mais influência a resistência é a meteorização uma vez que afeta as superfícies de descontinuidade das rochas, onde atuam este tipo de fenómenos de alteração (Ferrer & Vallejo, 2007).

Numa primeira análise é fundamental descrever o estado de meteorização do talude rochoso através da ISRM (1978), que define os graus de alteração a considerar como sendo constituído por 5 termos, por sua vez, a GSE (1995) considerou 6 termos, onde o sexto termo é atribuído a solos residuais. Na análise de taludes, muitas vezes é considerado, de forma simplificada, a utilização de 3 termos em vez 5 termos, como pode-se observar na Tabela 14. Na versão simplificada da ISRM (1981) adota-se três classes com as seguintes designações:

W₁₋₂ – Rocha são a pouco alterada;

W₃ – Rocha medianamente alterada;

W₄₋₅ – Rocha muito alterada a decomposta.

Tabela 14 - Grau de alteração propostos pela ISRM (1981) e GSE (1995)

Grau de alteração	Simbologia	Descrição
São ou não alterada	W ₁	<p>Não se observam sinais de alteração na matriz rochosa.</p> <p>Mudanças na cor original da matriz rochosa (descoloração).</p>
Ligeiramente alterada	W ₂	
Moderadamente alterada	W ₃	<p>Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo, mantendo-se a petrofábrica original.</p> <p>-Maciço mais ou menos são; -Intersectado por descontinuidades abertas;</p>
Muito alterada	W ₄	<p>Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo; a rocha é muito friável.</p> <p>Todo o material rochoso está muito decomposto e/ou desagregado num solo residual.</p> <p>-Zona alterada a muito alterada ou mesmo decomposta; -Permeabilidade do tipo intersticial; -Pode coexistir uma circulação fissural;</p>
Completamente alterada	W ₅	

2.4.4.9 Percolação de água

A percolação está diretamente relacionada com a corrente de água e/ou humidade livre, estas podem ser observadas nas descontinuidades individualmente assim como no maciço rochoso de modo geral.

Pode-se definir a água como um dos agentes fulcrais na erosão dos solos e na modificação das rochas. A percolação de água ao longo do talude vai dar-se sobretudo pela corrente de água ao longo do conjunto de descontinuidades. A deteção da presença de água pode ser observada ao longo da extensão das descontinuidades.

A deteção da posição do nível freático, assim como dos percursos de percolação, vai dar, muitas vezes indicação da presença de possíveis problemas de estabilidade ((CFEFF, 1996); (Hoek E. , 2006)). Pode-se observar que a abertura e tipo de material que preenche as descontinuidades influencia de modo determinante a percolação da água. A origem e idade das descontinuidades são outro dos fatores a ter em conta quando pretende-se analisar a percolação da água uma vez que, quanto mais recentes são as descontinuidades, maior a probabilidade de ocorrer percolação de água, pois elas ainda não foram obstruídas nem cimentadas por materiais de preenchimento (Giani, 1992).

A percolação nas descontinuidades pode ser quantificada segundo Bieniawski (1989), conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Classificação da percolação das descontinuidades (adaptado de Bieniawski Z. T., 1989)

Parâmetro	Descrição
Presença de água nas descontinuidades	Completamente seca
	Húmido
	Molhado
	Escorrimento
	Fluxo contínuo

Segundo a ISRM (1981), pode-se realizar à distinção da percolação em descontinuidades sem preenchimento e com material de preenchimento, na Tabela 16 apresenta-se a classificação segundo a ISRM (1998).

Tabela 16 - Descrição de presença de água nas descontinuidades (adaptado de ISRM, 1981)

Classe	Descontinuidade sem preenchimento	Descontinuidade com enchimento
I	Fatura 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	Fatura seca e sem evidência de circulação de água.	Enchimento muito consolidado e seco. Não é possível a circulação de água.
III	Fatura seca e com evidências de percolação de água.	Enchimento húmido e com presença de gotas ocasionais.
IV	Fatura húmida, sem circulação de água livre.	Enchimento que mostra evidências de lavagem e com fluxo de água contínua.
V	Fatura, ocasionalmente gotejando, mas sem fluxo contínuo.	Enchimento localmente lavado e com fluxo considerável.
VI	Fatura com fluxo contínuo de água.	Enchimento completamente lavado e com pressão de água elevadas.

3.

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA E TÉCNICAS DE ESTABILIDADE DE TALUDES ROCHOSOS

3.1 Generalidades

Pode-se afirmar que a teoria, na engenharia de maciços rochosos, derivou do conhecimento adquirido com a prática. As diferentes teorias e métodos de cálculo de suporte surgiram muito depois da execução das primeiras obras de escavação em maciços rochosos (Brown, 1991).

Pode-se designar o maciço rochoso como um meio descontínuo que apresenta um comportamento que pode ser analisado em função da sua utilização, mediante a análise direta ou através da realização de simples ensaios. A necessidade de, durante as primeiras etapas de um projeto de engenharia, se saber as características e o comportamento do maciço, levou ao surgimento das classificações geomecânicas aplicadas a maciços rochosos com base em fatores de qualidade. As classificações geomecânicas tem por base uma metodologia que contempla duas fases:

- ❖ Caracterização (tem por base identificar e calcular os parâmetros geotécnicos, geológicos e geomecânicos do material e do maciço);
- ❖ Estabelecimento de uma classificação (cada parâmetro geológico e geotécnico, que foram objeto de análise numa fase anterior, vai ter distintos pesos).

As classificações têm grande relevância em fases de estudo preliminares, pois tem-se escassa informação do maciço rochoso. Pode-se designar como informações de base, para a obtenção da classificação do maciço, as características do material rocha, as características das descontinuidades e a geometria (Priest, 1993).

O objetivo principal quando aplica-se as classificações geomecânicas é na avaliação da qualidade geotécnica do talude rochoso, após esta avaliação pode-se definir os sistemas de estabilização mais adequados a cada caso. A avaliação do talude rochoso, através das classificações, tem como principal propósito a obtenção do “índice de qualidade do maciço”.

3.2 Taludes

Define-se talude (Figura 12) como uma superfície inclinada que delimita uma massa de solo, rocha ou outro material qualquer, resultando de uma escavação, aterro ou podendo também ser de origem natural. Pode-se definir dois tipos de taludes, naturais e artificiais. Os taludes naturais são compostos por diferentes materiais, tem uma maior complexidade geológica, maior heterogeneidade e sobretudo

anisotropia. Os taludes artificiais surgem pela mão do homem de modo a criar plataformas que permitam a construção de caminhos-de-ferro, estradas ou outros tipos de construções.

A criação de um talude ocorre através de meios mecânicos ou então com recurso a explosivos, estes métodos conduzem a uma alteração da estabilidade do maciço rochoso, seja por descompressão do maciço ou pela exposição direta da superfície aos agentes atmosféricos, conduzindo a processos de meteorização.

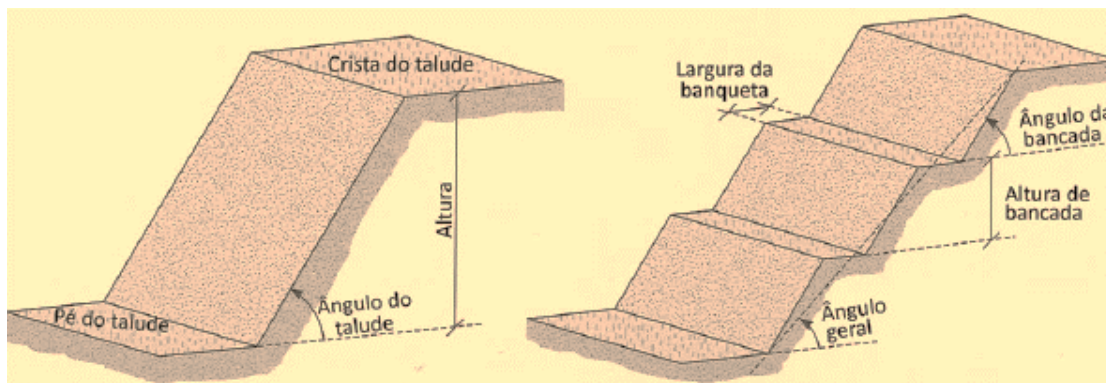


Figura 12 - Representação de taludes (González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2002)

Perante algumas condições específicas, uma parte do material de um talude pode deslocar-se relativamente ao resto do maciço. Este processo é denominado de movimento de massa, ao longo de uma superfície e designa-se de superfície de rutura. Um dado talude estará submetido basicamente a dois géneros de forças: forças de instabilidade – que levam ao movimento de uma porção de massa ao longo da superfície de rutura e forças de resistência – que se opõem a ação do movimento de massa.

3.2.1 Tipos de instabilidade em taludes

O tipo de estruturas geológicas que compõe o talude rochoso está intimamente ligado á instabilidade, por isso é muito importante, numa fase preliminar dos estudos, reconhecer quais as possíveis situações de instabilidade que as estruturas podem ocasionar. Pode-se definir os vários tipos de rotura do talude, através da descrição geométrica com que a rotura ocorre (Bienniawski, 1967).

Pode-se definir os vários parâmetros que condicionam os diferentes tipos de rotura, são eles, o grau de fracturação do maciço rochoso e a disposição e orientação das discontinuidades. A estabilidade ficará definida pelos critérios de resistência das discontinuidades e da matriz rochosa. Os maciços rochosos resistentes são condicionados pelas discontinuidades que determinam os planos de rutura. A matriz possui um papel fundamental na geração dos planos e mecanismos de rotura quando se está na presença de maciços formados por rochas brandas ou pouco competentes.

Define-se três tipos de causas principais para a instabilidade de taludes, como se verifica na Tabela 17.

Tabela 17 - Causas de instabilidade de taludes

Tipo de causas	Consequência
Causas externas	Aumento da inclinação do talude (devido à erosão provocada pela água ou pela escavação); Aumento da altura do talude (devido a escavação do pé do talude); Aplicação de sobrecargas no talude, sobretudo na parte superior do talude; Erosão superficial; Abalos sísmicos ou vibrações induzidas no terreno; Variação sazonal da temperatura no talude; Efeitos do congelamento da água no terreno e conseqüente aumento do volume;
Causas intermédias	Rebaixamento rápido do nível das águas exteriores; Liquefação do solo; Erosão interna, devido a circulação de água no interior do talude;
Causas internas	Diminuição da resistência dos terrenos; Aumento das pressões intersticiais, levando a uma redução da resistência ao corte;

Nos taludes rochosos pode-se definir três tipos possíveis de rotura, que de um modo geral, são condicionados pela orientação e distribuição das descontinuidades e pelo grau de compartimentação do maciço. Verificam-se três tipos de instabilidade de taludes rochosos: planar, cunha e tombamento.

3.2.1.1 Rotura planar

Define-se a rotura planar pela sua origem na superfície pré-existente, esta superfície pode ser definida por diáclase, falhas ou estratificações. Os principais deslizamentos que ocorrem nos taludes rochosos estão diretamente associados às faces da descontinuidade pré-existente. Pode-se definir como condição básica para ocorrer rotura planar, a presença de descontinuidades com pendora na mesma direção que o talude ($\psi > \alpha$) e o pendora deve ser maior que o ângulo de atrito interno ($\alpha > \phi$), Figura 13 (González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2002).

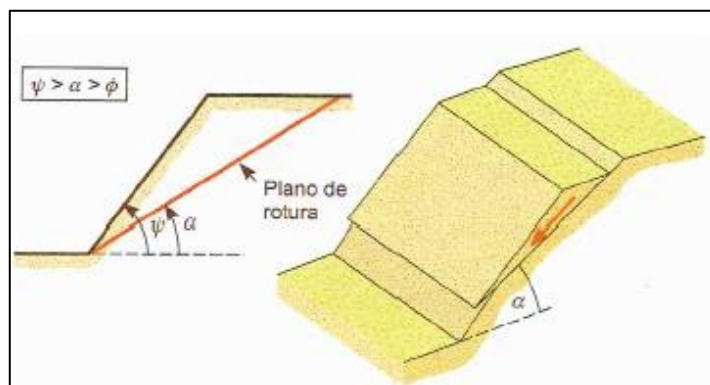


Figura 13 - Rotura planar (adaptado de González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2002)

Quando se está analisando a estabilidade de taludes rochosos deve-se ter em conta a grande importância da presença de água nas descontinuidades, a água nos planos de escorregamento reduz significativamente a resistência ao corte.

Segundo Wyllie & Mah (2004), as condições preliminares necessárias para a ocorrência de escorregamentos planares são:

- ❖ O pendora do plano de deslizamento deve ser quase paralelo à direção da face do talude;
- ❖ O ângulo de inclinação do plano de escorregamento deve ser maior que o ângulo de atrito daquele plano, em condições drenadas;
- ❖ O ângulo da face do talude deve ser superior ao ângulo de inclinação da descontinuidade;

3.2.1.2 Rotura em cunha

Os escorregamentos por cunha estão dependentes das estruturas planares nos maciços rochosos, em que a sua direção de movimento surge ao longo do plano de cruzamento das superfícies de rotura. Numa forma simplista pode-se definir a rotura em cunha como o escorregamento de um bloco em forma de cunha, constituído por duas superfícies de descontinuidade que se intersectam, ficando a inclinação das superfícies de deslizamento limitada pela geometria da cunha (Figura 14).

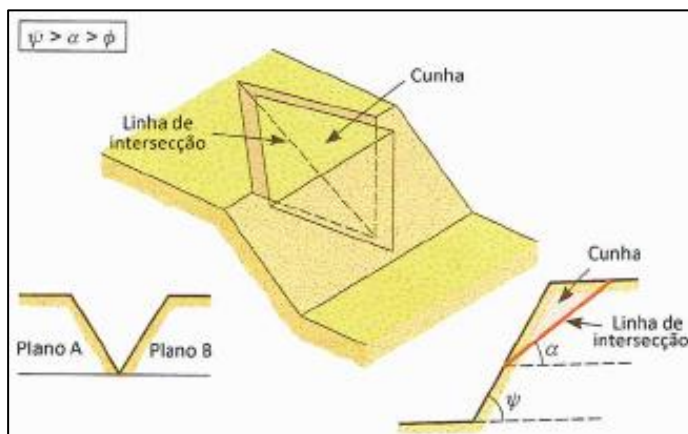


Figura 14 - Rotura em cunha (adaptado de González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2002)

Para que o deslizamento ocorra ao longo da linha de intersecção da cunha, devem ser observadas as seguintes condições:

- ❖ O escorregamento ao longo da linha de intersecção quando a sua inclinação é menor que o ângulo de inclinação visível da face do talude;
- ❖ A linha das superfícies de deslizamento deverá intersectar no talude;
- ❖ A intersecção dos dois planos de escorregamento deverá convergir no talude;
- ❖ O ângulo de atrito dos planos deverá ser menor que a linha de intersecção.

3.2.1.3 Rotura por tombamento

A rotura por tombamento surge da rotação de blocos de rocha sobre um ponto fixo, para poder existir este tipo de rotura é necessária a existência de famílias de descontinuidades paralelas ou sub-paralelas à face do talude (Goodman, 1989). Quando o material rocha se liberta do talude, movimenta-se para

a frente do mesmo, deslocando-se rapidamente pela face do talude, podendo este deslizar, rolar e fraturar. Neste tipo de rotura vai-se ter dois tipos de descontinuidade a interagirem entre si, uma das descontinuidades exibe uma inclinação contrária à inclinação do talude, enquanto as outras descontinuidades têm direção paralela ou sub-paralelas ao mesmo (Figura 15). No geral, o maciço apresenta-se dividido em blocos pela interação das descontinuidades ortogonais, neste tipo de rotura a estabilidade não está unicamente condicionada pela resistência ao deslizamento, a rotura vai implicar movimento de rotação dos blocos (Wyllie & Mah, 2004).

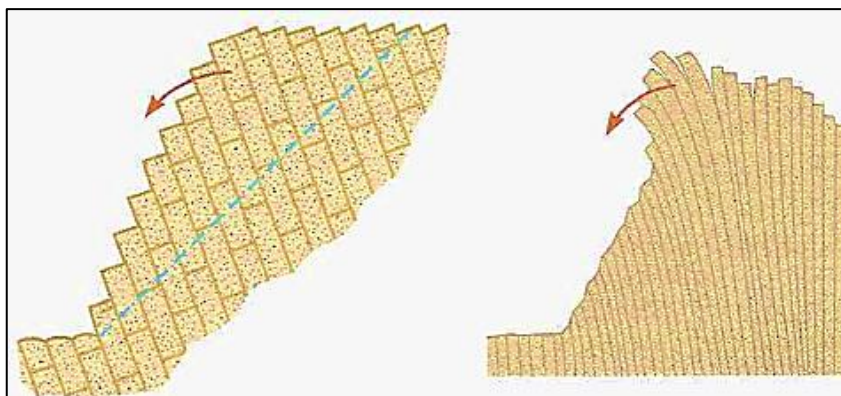


Figura 15 - Rotura por tombamento (adaptado de González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2002)

Para que possa ocorrer rotura por tombamento de blocos, as seguintes condições devem estar presentes no talude:

- ❖ A orientação das descontinuidades e da face do talude devem ser sub-paralelas;
- ❖ Tem de ocorrer duas famílias de descontinuidades que se intercetam, uma das famílias a favor e a outra contra a inclinação do talude;

3.3 Classificações geomecânicas de taludes

3.3.1 Generalidades

Devido à necessidade de, durante as primeiras etapas de um projeto de engenharia, se conhecer as particularidades assim como o comportamento dos maciços, com base em parâmetros de qualidade, surgiram as classificações geomecânicas aplicadas a maciços rochosos.

Pode-se afirmar que estas classificações geomecânicas são de grande utilidade em fases de estudos prematuras, quando a informação do talude rochoso é muito escassa (Hoek E. , 2006). A classificação dos taludes rochosos tem como principal objetivo obter valores que ajudem na tomada de decisões, através do processamento de informação (Priest, 1993).

Ao longo dos tempos as classificações geomecânicas foram reconhecidas pela sua importância, por serem imprescindíveis para a determinação da qualidade de taludes rochosos, estas foram aperfeiçoadas passando a incluir vários elementos de carácter geotécnico e geológico-estrutural.

Pode-se afirmar que a classificação implica uma simplificação, conduzindo a uma interpretação dos dados, por isso considera-se como classificações empíricas (Bieniawski Z. T., 1989). Para poder-se estabelecer uma classificação geomecânica, há que procurar caracterizar, correlacionar, definir e quantificar parâmetros geomecânicos do talude rochoso.

A utilização das classificações geomecânicas, não substitui a utilização de ensaios mais complexos que fornecem uma informação mais precisa da resistência “*in situ*” do maciço rochoso, ou seja, importa compreender as limitações da utilização das classificações (Palmstrom A. , 1985).

A utilização de pelo menos dois métodos de classificação vai constituir uma base sólida, assim como diferentes sistemas de classificação podem mostrar distintas perspectivas nos diferentes parâmetros (Hoek, Kaiser, & Bawden, 1995). As classificações utilizadas para caracterizar o talude, têm por base alguns dos seguintes parâmetros (Ferrer & Vallejo, 2007):

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

As classificações geomecânicas foram inicialmente propostas para escavações subterrâneas, como é o caso das classificações de Terzaghi (Rock Load Mass Classification System, 1946), Lauffer (1958), Deere (Rock Quality Designation Index, 1967) mas, mediante a necessidade de conceber novas formas de classificação para as diversas intervenções, outros sistemas foram sendo desenvolvidos por outros autores tais como Wickham (Rock Structure Rating, 1972), Bieniawski (Rock Mass Rating, 1973), Barton et al. (Rock Tunnelling Quality Index (Q), 1974), Rocha (1976) e Romana (Slope Mass Rating, 1985), entre as diversas classificações existem algumas diferenças.

Pode-se definir os índices, RMS (Selby, 1980), RMR (Bieniawski Z. T., Engineering Rock Mass Classifications, 1989) e SMR (Romana M. , 1993) como os índices geomecânicos mais utilizados na classificação geomecânica de taludes rochosos, tendo esta última maior aceitação desde o seu aparecimento.

O tipo de correção vai depender da orientação relativa entre as descontinuidades e o talude bem como do método utilizado na escavação (Tomás, et al., 2006). Estas classificações são bastante afetadas pelas descontinuidades e suas particularidades intrínsecas, elevando a sua importância no comportamento dos maciços face às solicitações que são impostas pela obra. A classificação consiste na atribuição de pesos aos critérios relativos às características do talude, sendo posteriormente obtido um índice geomecânico este resulta de aplicação de expressões de cálculo.

Este trabalho tem por objetivo a problemática dos taludes rochosos, as classificações que são apresentadas neste trabalho são a classificação Rock Mass Rating (RMR) e a classificação Geological Strength Index (GSI).

3.3.2 Classificação RMR (Rock Mass Rating)

A classificação geomecânica RMR (Rock Mass Rating), também designada por classificação de Bieniawski, foi proposta pelo Engenheiro Bieniawski em 1974 tendo sido sucessivamente modificada ao longo dos anos. Permite fazer uma classificação das rochas “in situ” e é usualmente utilizada em túneis, taludes e fundações. Esta classificação tem por base a obtenção de um índice de qualidade, e também permite ajustar a classificação através de um fator de correção.

As várias versões desta classificação surgiram em função de um vasto número de obras, tendo sido aprimorada ao longo do tempo pela análise de inúmeros casos práticos (Bieniawski Z. T., 1989). A classificação RMR na sua formação de base incorpora oito parâmetros geológicos-geotécnicos, sendo posteriormente reduzida para seis parâmetros que condiciona de modo determinante o comportamento dos maciços rochosos. A cada um dos parâmetros são atribuídos pesos, sendo estes que melhor descrevem o comportamento do talude rochoso (Bieniawski Z. T., 1989).

Pode-se descrever a classificação RMR em seis parâmetros, sendo estes apresentados de seguida, assim como os respetivos pesos relativos atribuídos a cada um deles:

- ❖ Resistência à rotura uniaxial do material rochoso intacto (0 – 15);
- ❖ Grau de compartimentação do maciço através do RQD “Rock Quality Designation” (0 – 20);
- ❖ Espaçamento das descontinuidades (0 – 20);
- ❖ Estado das descontinuidades em termos de continuidade, rugosidade, preenchimento e abertura (0 – 30);
- ❖ Condições hidrogeológicas, estimada para as piores condições possíveis (0 – 15);
- ❖ Orientação das descontinuidades em relação à orientação da escavação (0 – (-50)).

Cada parâmetro descrito anteriormente é classificado em termos de valor ponderado, o somatório de cada um dos parâmetros permite definir um valor que varia entre zero e cem, este valor permite definir um índice de qualidade que é designado como RMR (Alberto, 2010).

O sexto parâmetro, “orientação das descontinuidades”, foi introduzido por (Bieniawski Z. T., 1989) como forma de ajuste do somatório dos cinco pesos anteriores, para poder ter em conta o efeito favorável ou desfavorável da orientação das descontinuidades. Uma determinada descontinuidade pode ter orientação favorável ou desfavorável sendo condicionada pela percolação de água assim como pelas próprias descontinuidades, logo conclui-se que não é fácil aplicar esta correção.

A Tabela 18 apresenta um quadro-síntese para a determinação dos pesos médios relativos dos cinco primeiros parâmetros da classificação RMR (Bieniawski R. Z., 2011).

Tabela 18 - Classificação geomecânica RMR (adaptado de Bieniawski Z. T., 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
		Peso RMR	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 50	< 25		
	Peso RMR		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		> 2 m	0,6 – 2,0 m	0,2 – 0,6 m	0,06 – 0,2 m	< 0,06 m		
	Peso RMR		20	15	10	8	5		
4	Condições das descontinuidades (ver Tabela 19 e Tabela 20)		Superfícies muito rugosas, não contínuas; Sem abertura; Paredes não meteorizadas	Superfícies ligeiramente rugosas; Separação <1mm; Paredes ligeiramente meteorizadas	Superfície ligeiramente rugosa; Separação <1mm; Paredes muito meteorizadas	Superfícies lisas ou enchimento; Separação <5mm ou aberturas contínuas com 1-5 mm	Enchimento mole com espessura <5mm ou abertura contínua com >5mm		
			Peso RMR		30	25	20	10	0
5	Presença de água	Condição gerais do maciço	Completamente seco	Ligeiramente e húmido	Húmido	Gotejante	Fluxo contínuo		
		Peso RMR		15	10	7	4	0	

Quando pretende-se fazer uma descrição mais detalhada das condições das descontinuidades deve ser utilizada a Tabela 19 e a Tabela 20, onde a soma dos pesos de cada um dos parâmetros resulta no valor a utilizar na tabela anterior.

Tabela 19 - Classificação das descontinuidades 1 – RMR (Bieniawski Z. T., 1989)

Descrição	Continuidade	Peso RMR	Abertura	Peso RMR	Rugosidade	Peso RMR
	< 1m	6	Nenhuma	6	Muito rugoso	6
1 – 3 m	4	< 0,1 mm	5	Rugoso	5	
3 – 10 m	2	0,1 – 1,0 mm	4	Ligeiramente rugoso	3	
10 – 20 m	1	1 – 5 mm	1	Liso	1	
> 20 m	0	> 5 mm	0	Espelhada	0	

Tabela 20 - Classificação das descontinuidades 2 – RMR (Bieniawski Z. T., 1989)

Descrição	Preenchimento	Peso RMR	Estado de meteorização	Peso RMR
	Nenhum	6	Inalterado	6
	Resistente com espessura <5mm	4	Ligeiramente meteorizado	5
	Resistente com espessura >5mm	2	Moderadamente meteorizado	3
	Mole com espessura <5mm	1	Muito meteorizado	1
	Mole com espessura >5mm	0	Completamente meteorizado ou decomposto	0

O sexto parâmetro (“Orientação das descontinuidades em relação à orientação da escavação”) anteriormente referido pode ser designado como um fator que permite o ajuste do somatório dos cinco anteriores pesos, o somatório dos primeiros cinco parâmetros é designado RMR básico. Este parâmetro tem por base a ligação entre a orientação das descontinuidades que fraturam o maciço e o sentido da escavação, após a sua aplicação obtém-se o RMR corrigido (Tabela 21).

Tabela 21 - Fatores corretivos consoante a orientação das descontinuidades (adaptado de Bieniawski Z. T., 1989)

	Obras	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Valor ponderado para o ajuste de RMR	Túneis	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

O valor de RMR é obtido através do somatório do peso relativo para cada um dos parâmetros anteriormente descritos, o valor do índice RMR varia entre 0 e 100. Após o cálculo do valor de RMR, pode caracterizar-se o maciço em termos de qualidade, sendo enquadrado numa das cinco classes sugeridas por Bieniawski (1989), descritas na Tabela 22.

Tabela 22 - Classe do maciço (adaptado de Bieniawski Z. T., 1989)

Valor de RMR	100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 21	< 21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Maciço rochoso de muito boa qualidade	Maciço rochoso de boa qualidade	Maciço rochoso de qualidade razoável	Maciço rochoso de fraca qualidade	Maciço rochoso de muito fraca qualidade

A classificação RMR agrega ao final, para cada uma das cinco classes do talude rochoso, uma estimativa do vão livre da seção e o tempo médio de autossustentação para o caso de túneis, assim como, os parâmetros da coesão e ângulo de atrito para o caso do maciço (Tabela 23).

Tabela 23 - Significado das classes (adaptado de Bieniawski Z. T., 1989)

Classe	I	II	III	IV	V
Tempo médio de autossustentação	10 anos	6 meses	1 semana	5 horas	10 minutos
Vão da seção	15 m	10 m	5 m	2,5 m	1 m
Coesão (KPa)	> 400	300 a 400	200 a 300	100 a 200	< 100
Ângulo de atrito	> 45°	35 a 45°	25 a 35°	15 a 25°	< 15°

A classificação RMR é um sistema de fácil aplicação, podendo os parâmetros utilizados ser obtidos em mapeamentos geológicos ou em furos de sondagem. Para poder-se utilizar esta classificação é conveniente dispor-se de todos os dados, sendo sugerido a aplicação de pelo menos duas classificações (Bieniawski Z. T., 1988).

3.3.2.1 Aplicação do RMR

A aplicação da classificação RMR pode ser utilizada em vários projetos de engenharia, tais como taludes, túneis, minas e fundações, sendo a sua principal aplicação em túneis. No início a aplicação desta classificação era sobretudo no campo de túneis, passando posteriormente a ser desenvolvidas outras aplicações, como para a determinação de propriedades do maciço rochoso. O sistema de classificação RMR pode ser útil em varias situações, como no auxílio de projetos de estabilidade de encostas, assim como na estimativa da deformabilidade. No caso particular do estudo de taludes rochosos, alguns parâmetros são úteis de conhecer, tais como o ângulo de atrito e a coesão do maciço.

Estimativa do módulo de deformabilidade:

O módulo de deformabilidade da massa rochosa é um parâmetro de grande importância, podendo ser obtido através do sistema de classificação RMR. A partir do valor da classificação geomecânica RMR pode-se estimar o valor da deformabilidade do maciço, para isso utilizam-se duas equações, uma quando o valor de RMR é superior à 50 (Equação 4) (Bieniawski Z. T., 1978) e a outra quando o valor de RMR é inferior a 50 (Equação 5) (Serafim & Pereira, 1983). Sendo E_M o módulo de deformabilidade “in situ” em GPa.

$$E_M = 2 * RMR - 100 \text{ [GPa]}$$

Equação 4 - Módulo de deformabilidade de um maciço quando $RMR > 50$ (Bieniawski Z. T., 1978)

$$E_M = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \text{ [GPa]}$$

Equação 5 - Módulo de deformabilidade de um maciço quando $RMR < 50$ (Serafim & Pereira, 1983)

Estimativa da coesão e ângulo de atrito:

No caso de análise de taludes rochosos, alguns valores como o ângulo de atrito e a coesão do maciço podem ser estimadas pela Tabela 23. Sen & Sadagah (2003) sugerem a determinação dos valores de

RMR de forma contínua para a modificação dos parâmetros, sem a repartição por classes de valores. Estes autores utilizaram gráficos com o intuito de relacionar os valores dos parâmetros com o respetivo peso relativo. Tendo em conta esses gráficos, os autores propõem algumas equações para a obtenção dos valores dos pesos relativos. De forma idêntica, os autores propõem a resolução através de equações para os parâmetros da coesão (c) e do ângulo de atrito (ϕ):

$$c = 3,625 * RMR \text{ [KPa]}$$

Equação 6 - Determinação da coesão a partir do RMR

$$\phi = \begin{cases} 25 * (1 + 0,01 * RMR) & [^\circ] & \text{Para } RMR \geq 20 \\ 1,5 * RMR & [^\circ] & \text{Para } RMR \leq 20 \end{cases}$$

Equação 7 - Determinação do ângulo de atrito a partir do RMR

Estimativa da resistência do maciço rochoso pelo critério de Hoek-Brown:

Alguns autores propuseram correlações com o intuito de obter os parâmetros de resistência do maciço, através da classificação RMR, Hoek & Brown (1980) propuseram uma relação entre as tensões máximas e mínimas de forma a determinar essa rotura. De seguida apresenta-se o critério de resistência para os maciços rochosos, resultando da generalização do critério Hoek-Brown:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_b * \sigma_3 * \sigma_c + S * \sigma_c^2)^a$$

Equação 8 - Critério generalizado de Hoek-Brown

No critério generalizado de Hoek-Brown, o parâmetro σ_1 é a tensão principal do maciço a uma pressão confinante σ_3 e σ_c é a tensão a compressão simples do maciço. A constante m_b é o valor minorado da constante m_i (constante da rocha intacta) e S varia com o tipo de rocha e com a qualidade do maciço. Já o parâmetro a é usualmente definido como 0,5. No **Anexo A** encontram-se os valores mais recentes para o parâmetro m_i , de acordo com cada tipo de rocha (Tabela A - 1).

A classificação RMR básica (sem a correção) pode ser relacionada com as constantes m e S da seguinte forma:

- ❖ Para maciços rochosos não perturbados (escavação por máquinas de perfuração):

$$m_b = m_i * e^{\frac{RMR-100}{28}}$$

Equação 9 - Valor reduzido da constante m_i

$$S = e^{\frac{RMR-100}{9}}$$

Equação 10 - Valor da constante S

- ❖ Para maciços rochosos perturbados (taludes ou escavações com danos por desmonte):

$$m_b = m_i * e^{\frac{RMR-100}{14}}$$

Equação 11 - Valor reduzido da constante m_i

$$S = e^{\frac{RMR-100}{6}}$$

Equação 12 - Valor da constante S

3.3.2.2 RQD (Rock Quality Designation)

O parâmetro RQD (Rock Quality Designation) foi desenvolvido por Deere (1966) como uma estimativa do índice de qualidade dos maciços rochosos. Os critérios relativos ao estado da fracturação e da meteorização são englobados no índice RQD, determinado através de amostras de sondagens executadas “in situ”.

O RQD é definido pelo quociente entre o somatório dos tarolos de amostra com tamanho iguais ou superior a 10 cm e o tamanho total do furo (Equação 13), este parâmetro é necessário para definir o índice RMR (Priest, 1993). A orientação da sondagem vai ter grande influência na determinação do parâmetro RQD, este permite uma estimativa da qualidade do maciço “in situ”.

$$RQD = \left(\frac{\sum \text{comprimento do tarolo} \geq 10 \text{ cm}}{\text{comprimento total do furo}} \right) * 100 \text{ [%]}$$

Equação 13 - Cálculo do índice RQD

Neste cálculo é imprescindível ter em consideração o tipo de fratura, caso estas resultem do manuseamento de explosivos, ou se desenvolvam por manuseamento ou descompressão do material são consideradas de fraturas artificiais, neste caso não devem ser tidas em conta no cálculo do RQD.

Tendo em conta os valores de RQD obtidos pela Equação 13, Deere propôs uma classificação da qualidade do maciço rochoso que se verifica na Tabela 24.

Tabela 24 - Classificação da qualidade do maciço rochoso tendo em conta o valor de RQD (adaptado de Deere & Miller, 1966)

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

A realização de sondagens nem sempre é possível, para ultrapassar este obstáculo recorre-se ao índice de afloramento volumétrico (J_v). Para cada um dos conjuntos de famílias de descontinuidades o valor de J_v pode ser obtido de acordo com a Equação 1.

Diversos autores apresentaram distintas correções para os valores de RQD, estes podem ser obtidos, de forma aproximada, através da expressão empírica de Palmstrom (2005) que estabelece a relação entre o índice de afloramento volumétrico (J_v) (Equação 1) e o valor de RQD, através da Equação 14:

$$RQD \approx 115 - 3,3 * J_v \quad \text{para } J_v > 4,5$$

$$RQD = 100 \quad \text{para } J_v \leq 4,5$$

Equação 14 - Estimativa do valor de RQD através do índice de afloramento

Outro dos autores que se debruçou sobre este parâmetro foi Priest & Hudson (1976) que correlacionou o parâmetro RQD com a frequência média das descontinuidades por metro linear (λ) (Equação 2). Neste sentido Priest & Hudson assumem que o espaçamento apresenta uma distribuição exponencial negativa, para chegar ao valor do índice de RQD teórico mínimo propôs a Equação 15:

$$RQD = e^{-0,1\lambda} * (0,1\lambda + 1) * 100$$

Equação 15 - Estimativa do valor de RQD através da frequência

3.3.3 Classificação GSI (Geological Strength Index)

O índice GSI foi introduzido por Hoek et al. (1995), sendo um dos sistemas de classificação mais recentes. Tem por base a estimativa da resistência de um maciço rochoso quando sujeito a diversas condições geológicas. A classificação GSI é estimada a partir do estado da superfície das descontinuidades presentes na rocha e da estrutura do maciço rochoso. Esta classificação não foi desenvolvida para a classificação de maciços rochosos, mas reflete, de facto, a qualidade deste.

O objetivo deste índice é refletir as particularidades de resistência do maciço rochoso no geral e não apenas na sua resposta a problemas particulares, como é o caso dos restantes sistemas de classificação. Para poder utilizar esta classificação deve conhecer-se as características do maciço, visto que, os princípios fornecem uma descrição generalizada tendo em conta a estrutura do maciço rochoso.

Ao longo dos anos o sistema de classificação GSI tem sido alvo de modificação e atualização, com o intuito de abranger diversos casos com características geológicas complexas. Ao fazer-se uma análise das condições do terreno, para a determinação do valor do GSI é conveniente saber se as descontinuidades, presentes no maciço, fazem parte da estrutura natural do maciço ou foram causadas pelo uso de explosivos.

Este tipo de classificação fundamenta-se na ideia de que a resistência de um maciço rochoso será influenciada, não só pelas propriedades da rocha intacta mais também pela facilidade em deslizar ou rodar quando estão sujeitas as diferentes condições de tensão ou pressão. O sistema de classificação de maciços rochosos, introduzido por Hoek et al. é demonstrado na Figura 17. O parâmetro GSI é estimado e não exato. Na figura 16, espoe-se os tarolos extraídos para diferentes qualidades de maciços rochosos.

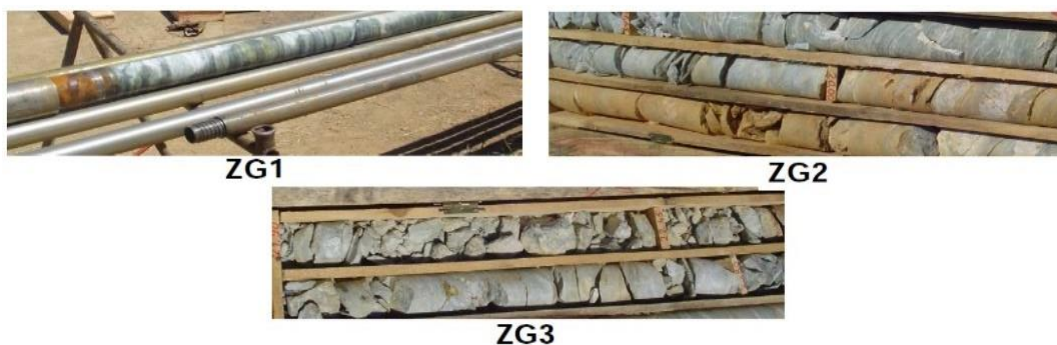


Figura 16 - Tarolos representativos da qualidade do maciço rochoso

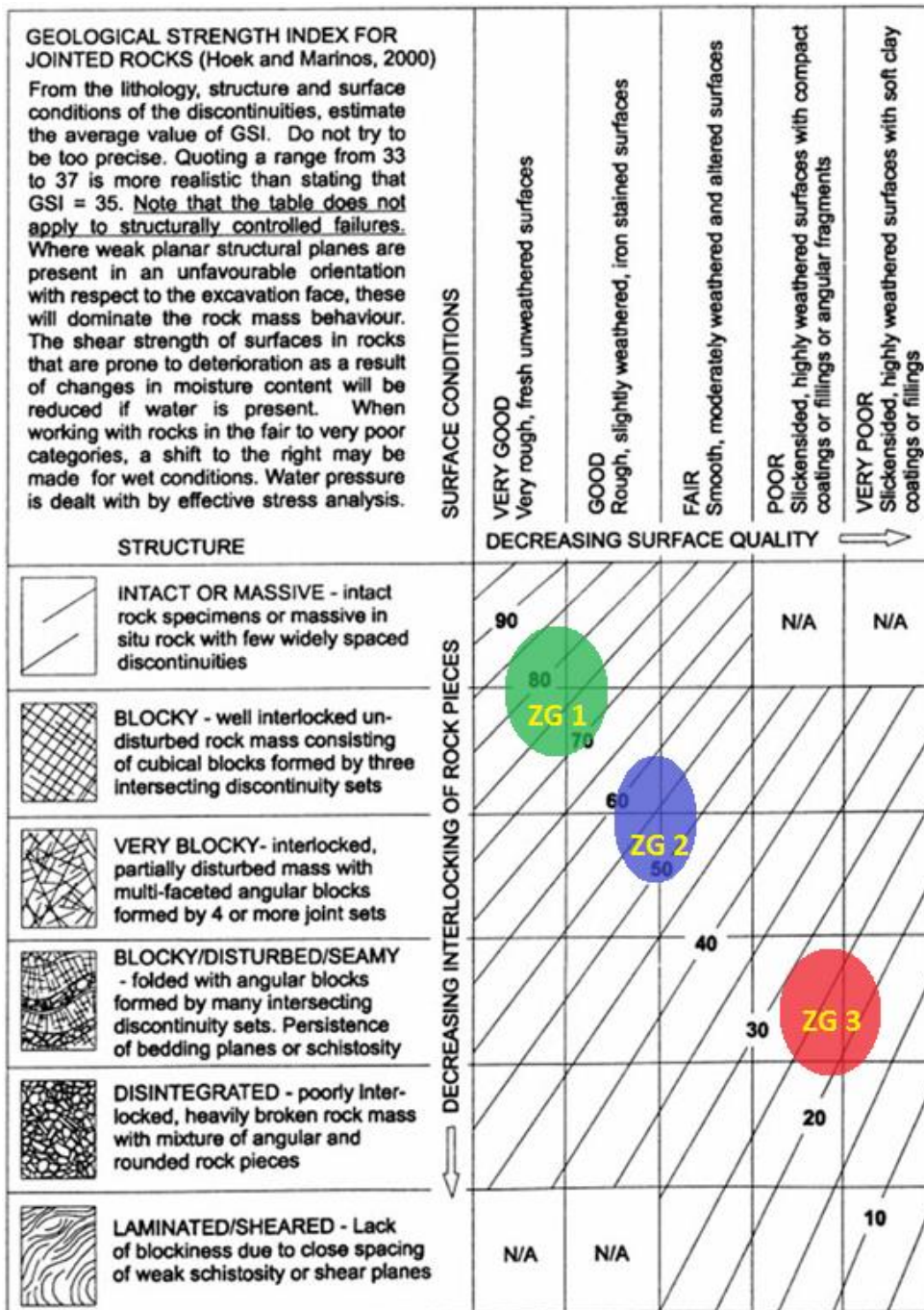


Figura 17 - Valor do índice GSI (adaptado de Miranda, Correia, & Ribeiro e Sousa, 2006)

A classificação GSI pode ser determinada diretamente da Figura 17, tendo em conta os seguintes intervalos para o valor do GSI em vez de considerar um único valor, Tabela 25:

Tabela 25 - Classe do maciço rochoso determinado a partir do GSI (adaptado de Hoek, Kaiser, & Bawden, 1995)

Valor do GSI	< 20	21 - 35	36 - 55	56 - 75	76 - 95
Qualidade do maciço rochoso	Muito fraco	Fraco	Razoável	Bom	Muito bom

Para maciços com a classificação RMR superior a 23, subentende-se maciço de boa qualidade, o valor de GSI pode ser determinado a partir da classificação de Bieniawski (RMR). Na determinação do valor GSI, para taludes de fraca qualidade, não deve-se utilizar o valor obtido na classificação RMR. Resumidamente, pode-se calcular o valor de GSI para maciços com uma classificação RMR superior a 23, através da relação presente na Equação 16.

$$GSI = RMR - 5$$

Equação 16 - Estimativa do valor de GSI pela classificação RMR

Aplicação do GSI:

Dada a complexidade da estimativa da qualidade da resistência de um talude rochoso, esta pode ser estabelecida por métodos empíricos, no entanto, nunca descartando a realização de ensaios em laboratório e em “*in situ*”. No âmbito de obras em encostas é conveniente estimar as características de deformação e resistência dos respectivos maciços, nesse sentido, Hoek-Brown referem o próprio critério de rotura.

As características que controlam a resistência e a deformabilidade dos maciços rochosos são idênticas às características definidas pela classificação RMR. Hoek-Brown admite que a classificação GSI consolida múltiplas versões do critério de rotura num único e descomplica o critério generalizado, que compreende todos os tipos de rochas presentes em maciço.

Desta forma, as características resistentes presentes no maciço podem ser determinadas através do índice GSI estimado. Os parâmetros que definem o critério de rotura de Hoek-Brown (Equação 8) podem ser estimados a partir das seguintes relações (Equação 17; Equação 18; Equação 19):

$$m_b = m_i * e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14*D}\right)}$$

Equação 17 - Valor reduzido da constante m_i

$$S = e^{\frac{GSI-100}{9-3*D}}$$

Equação 18 - Valor da constante S

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} * \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right)$$

Equação 19 - Valor da constante a

O fator D depende do grau de perturbação do maciço rochoso, este fator vai obedecer ao tipo de escavação utilizada no processo ou a libertação de tensões. Os valores de D variam entre 0, para maciços pouco ou nada perturbados, e 1 para maciços bastante perturbados.

3.4 Análise de estabilidade

Podem-se estabelecer vários fatores que contribuem para a instabilidade de um talude, são eles: fatores geométricos (inclinação e altura), fatores hidrogeológicos (ocorrência de água), fatores geológicos (zonas de anisotropia e debilidade no talude) e fatores geotécnicos relacionados com o

comportamento mecânico do maciço (deformação e resistência). As condições de rotura de uma ou várias superfícies, desde que seja possível o movimento de um certo volume de rocha, surge da combinação dos fatores descritos anteriormente. Pode-se estabelecer dois grandes grupos, geométricos e geológicos, que controlam principalmente a possibilidade de rotura e os modelos e mecanismos de instabilidade dos taludes.

Na presença de maciços rochosos competentes, pode-se definir como principal fator condicionante a estrutura geológica: a frequência e disposição das superfícies de descontinuidades assim como o seu grau de fracturação. Os fatores condicionantes (designa-se de “passivos”) são definidos como fatores inerentes ao material, são estes que podem provocar a rotura, já os fatores desestabilizadores (designa-se de “ativos”) são fatores externos que atuam sobre o maciço alterando as suas características, condições de equilíbrio e propriedades do talude. Na Tabela 26 estão descritos os fatores que influenciam a estabilidade de taludes.

Tabela 26 - Fatores que influenciam a estabilidade dos taludes (Adaptado de González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2002)

Fatores condicionantes	Fatores desestabilizadores
Estrutura geológica	Cargas dinâmicas
Estratigrafia e litologia	Sobrecargas estáticas
Condições e comportamento hidrogeológico dos materiais	Alterações nas condições climáticas
Propriedades físicas e mecânicas	Variações na geometria
Tensões naturais e tesões induzidas	Redução de parâmetros de resistência

A diminuição do risco de instabilidade pode ser feita através de um fator de segurança adequado, tendo em conta à análise de estabilidade. Este fator vai depender da finalidade e do carácter definitivo ou temporário do talude, riscos ou consequências que podem causar a rotura. O coeficiente de segurança de um talude permanente deve ser superior a 1.5, ou até 2.0, dependendo da confiança que se detenha nos dados geotécnicos que interferem nos cálculos e da segurança pretendida. A superfície de rotura que provoca a instabilização de um talude vai depender da resistência ao corte dessa superfície, que é determinado pelos parâmetros resistentes: ângulo de atrito interno (ϕ) e coesão (c).

Nos maciços rochosos normalmente associa-se à instabilidade as propriedades resistentes das descontinuidades, que controlam o comportamento do talude, mas nem sempre essa instabilidade pode ser reduzida às descontinuidades presentes no maciço rochoso, podendo ocorrer superfícies de rotura ao longo de todo o maciço.

Pode-se dividir os métodos de análise de estabilidade de taludes em três grandes grupos principais:

- ❖ Métodos experimentais: utiliza-se modelos físicos com diferentes escalas;
- ❖ Métodos analíticos: tem por base a teoria do equilíbrio limite, que traduz-se através de um coeficiente de segurança (FS);
- ❖ Métodos de observação: baseia-se na experiência acumulada com análises de rotura anteriores.

Os métodos analíticos apoiam-se numa perspetiva de equilíbrio limite onde interferem as forças desestabilizadoras e as forças estabilizadoras que atuam no talude. Podem agrupar-se em:

- ❖ Métodos determinísticos: sabidas ou admitidas as condições em que se encontra um talude, este método permite saber se o talude é ou não estável. Para este método é necessário conhecer os valores adequados dos parâmetros mecânicos e físicos que controlam o comportamento do material para, definir o fator de segurança do talude;
- ❖ Métodos probabilísticos: sob determinadas condições, considera a probabilidade de rotura de um talude. É imprescindível saber as funções de distribuição dos diferentes valores admitidos como variáveis aleatórias nas análises, realizando-se processos iterativos para o cálculo da probabilidade de rotura.

Após conhecer todos os parâmetros necessários e influentes na estabilidade de um talude, deve-se eleger um método ou modelo que melhor reproduz as condições particulares de cada caso. Na análise determinística, os métodos de equilíbrio fundamentam-se nas expressões de Mohr-Coulomb para calcular a tensão de corte resistentes na extensão da superfície de rotura. Este tipo de análise, determinística, baseia-se em métodos de equilíbrio limite que quantifica os valores médios como parâmetro de entrada. Os parâmetros físicos, geométricos e resistentes do talude são atribuídos com o intuito de definir o fator de segurança, cujo significado é um pouco subjetivo (Miguel, 2012).

Método de equilíbrio limite:

A avaliação da estabilidade de taludes em maciços, por via analítica baseia-se no princípio base do método do equilíbrio limite. Este método permite calcular o equilíbrio de uma massa de solo, da qual a rotura dá-se ao longo de uma superfície plana, circular ou um misto das duas. Os métodos de equilíbrio limite são dos mais utilizados, estudam o equilíbrio de uma massa potencialmente instável e tem por base a comparação entre as forças estabilizadoras e as forças que provocam o movimento ao longo da superfície de rotura. Tais métodos têm na sua génese:

- ❖ A seleção de uma superfície teórica de rotura no talude;
- ❖ O modo de rotura de Mohr-Coulomb (normalmente) ou de Barton;
- ❖ A definição do conceito de segurança.

A estabilidade de um talude é um problema estaticamente indeterminado, para a sua resolução é essencial considerar uma sucessão de hipóteses de partida, sendo estas diferentes em função do método. Porém, de uma maneira geral são adotadas as seguintes condições:

- ❖ A superfície de rotura deve ter uma geometria que permita a ocorrência do deslizamento;
- ❖ As forças presentes na superfície de rotura devem ser determinadas utilizando dados conhecidos (pressão da água, peso volúmico do material, forças externas);
- ❖ A resistência é recrutada simultaneamente ao longo de toda a superfície de rotura.

Tendo estas condições satisfeitas pode-se determinar as equações de equilíbrio entre as forças desestabilizadoras e as forças estabilizadoras. As análises têm como intuito determinar o coeficiente

de segurança do talude para a superfície analisada. O fator de segurança (Equação 20) é o valor mínimo pelo qual devem ser divididas as forças resistentes para conseguir o equilíbrio limite.

$$F.S. = \frac{F_{stb}}{F_{dst}}$$

Equação 20 - Fator de segurança

Na Tabela 27 apresenta-se os fatores de segurança determinísticos e as respectivas condições de estabilidade de taludes.

Tabela 27 - Condições de estabilidade e respetivos fatores de segurança de taludes (Adaptado de Miguel, 2012)

Coefficiente de segurança (F.S.)	Condições do talude
F.S. < 1,0	Talude instável, o talude deverá sofrer rotura.
F.S. = 1,0	Condição limite de estabilidade.
F.S. > 1,0	Condição estável, quanto mais próximo de 1,0 for F.S. mais frágil será a condição de estabilidade do talude.
F.S. >> 1,0	Condição estável, quanto maior for o F.S. menor serão as possibilidades de rotura do talude.

O método de equilíbrio limite baseia-se no conhecimento da geometria e dos parâmetros de resistência do maciço para determinar o equilíbrio em função do fator de segurança (Calle, 2000). Existem vários métodos de equilíbrio limite para a análise de taludes, estes foram desenvolvidos ao longo dos anos, tendo cada método uma precisão e rigorosidade associada. Os principais métodos utilizados são: Morgenstern & Price, Janbu, Fellenius, Bishop e Spencer, todos eles têm na sua génese o critério de rotura de Mohr-Coulomb (Calle, 2000).

A diferença entre os vários métodos reside nos diferentes pressupostos para as forças entre fatias. Na Tabela 28 apresenta-se as particularidades mais importantes assim como os principais métodos de equilíbrio limite usados para a análise de estabilidade.

Tabela 28 - Características dos métodos de equilíbrio limite (adaptado de Miguel, 2012)

Método	Características
Fellenius (1927)	Superfícies de rotura circulares; Satisfaz o equilíbrio de momentos;
Bishop Simplificado (1955)	Superfícies de rotura circulares; Satisfaz o equilíbrio de momentos e de forças verticais;
Janbu Simplificado (1967)	Superfícies de rotura quaisquer; Satisfaz o equilíbrio de forças vertical e horizontal;
Morgenstern & Price (1965)	Superfícies de rotura quaisquer; Satisfaz o equilíbrio de forças verticais e horizontais e de momentos
Spencer (1967)	Superfícies de rotura quaisquer; Satisfaz o equilíbrio de forças verticais e horizontais e de momentos

3.5 Técnicas de estabilização de taludes

A natureza está em constante mudança, levando a que ocorra meteorização, consistindo na alteração física e química das rochas. Quando se prevê a ocorrência de algum tipo de rotura ou instabilidade, deve-se adotar determinadas medidas de estabilização no talude, com o intuito de impedir a ocorrência de catástrofes. Um dos grandes problemas em taludes naturais é a queda de blocos, levando a uma grande mobilização de volumes de rochas, isto deve-se sobretudo à elevada inclinação (Hoek E. , 2006).

A avaliação dos taludes rochosos potencialmente inseguros é um trabalho difícil e exige uma análise detalhada impondo sempre o bom senso de engenharia para que se consiga compreender os fatores perturbadores que atuam sobre o talude.

Pode-se dividir as técnicas de estabilização de taludes em dois grandes grupos: um de obras de proteção, com as quais se tenta evitar que os blocos atinjam estruturas importantes, tais como estradas, e o segundo, de obras de reforço, que tentam fixar blocos soltos evitando a sua queda (Requetim L. , Pinho, Lopes, Duarte, & Valente, 2006).

3.5.1 Medidas de proteção

3.5.1.1 Redes metálicas

As redes metálicas de proteção são utilizadas em zonas do talude que se encontram muito fraturadas para prevenir a queda de blocos rochosos em queda livre, logo após o seu desprendimento de zonas do talude. A utilização desta técnica ocorre sobretudo quando está-se perante a rotura em cunha ou pequenos desprendimentos.

Pode-se obter dois tipos de redes metálicas, com dupla ou tripla torção, em algumas situações pode-se optar pelo reforço da rede metálica com cabos metálicos que são ancorados ou pregados na superfície do talude (Ferrer & Vallejo, 2007).

A aplicação de redes metálicas em taludes instáveis pode ser realizada de duas formas:

- ❖ **Redes suspensas:** (Figura 18) são utilizadas quando pretende-se proteger uma área, controlando assim a trajetória dos blocos de rocha e possibilitando uma deposição e acumulação dos blocos na base do talude. A função das redes suspensas é intercetar massas de rochas, evitando que os blocos atinjam velocidades excessivas, controlando a sua trajetória. Este tipo de solução é aplicada a partir da crista do talude com pregagem com comprimento variável, já na sua base é frequente colocar um contrapeso com o objetivo de manter a rede estendida, coloca-se um varão de aço na sua base.

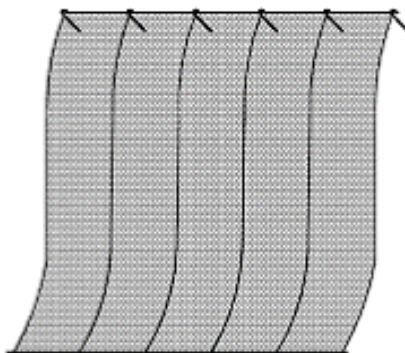


Figura 18 - Desenho tipo de redes suspensas (adaptado de (Rodrigues, 2013))

- ❖ **Redes pregadas:** (Figura 19) estabilização passiva, de blocos de rochas de modo a não possibilitar a sua queda para determinada área a proteger minimizando assim a descompressão do maciço rochoso. Esta solução é normalmente utilizada quando tem-se taludes descomprimidos, praticamente verticais e com blocos de várias dimensões onde não ocorre a acumulação ordenada dos blocos na base do talude. Este tipo de solução é muito utilizado na estabilização de taludes, porque conseguem revestir uma maior diversidade de soluções de desprendimentos.

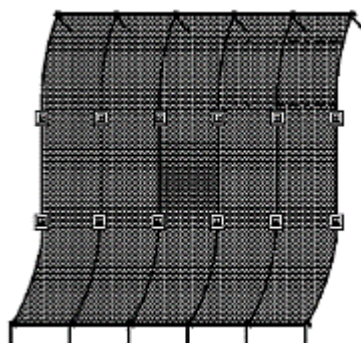


Figura 19 - Desenho tipo de redes pregadas (adaptado de Rodrigues, 2013)

3.5.1.2 Drenagem

A drenagem é muito relevante e pode ser um fator muito determinante no auxílio da estabilização de um talude, as drenagens em taludes rochosos resumem-se em dois tipos:

- ❖ **Drenagem interna:** (Figura 20) nos maciços rochosos, as descontinuidades superficiais são normalmente maiores e mais permeáveis que as descontinuidades em profundidade, logo os problemas de drenagem interna são pouco relevantes quando se esta a tratar de estabilidade de taludes rochosos (Romana M. , 1993). A solução mais comum para estes casos é executar um furo drenante, levando este a intersestar o maior número de famílias de descontinuidades possível.

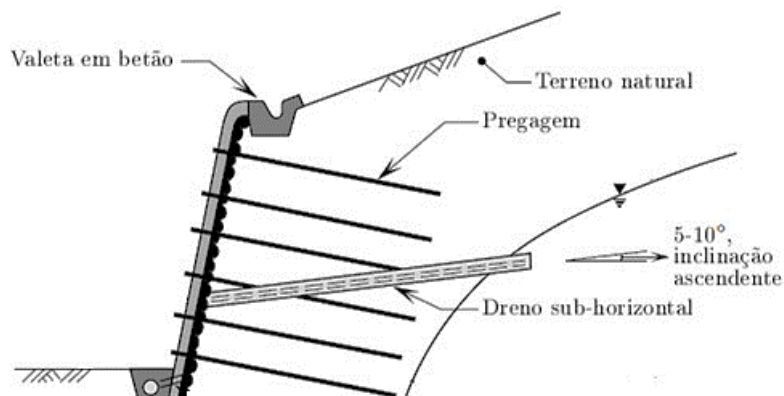


Figura 20 - Dreno sub-horizonta instalado numa solução de pregagens (adaptado de Santos, 2014)

- ❖ **Drenagem superficial:** quando se tem um sistema deficiente de drenagem superficial, este pode levar a um aumento da pressão hidrostática no interior do maciço rochoso conduzindo a uma diminuição da resistência ao corte nas discontinuidades. Como solução para este tipo de problema pode-se adotar valetas abertas ao longo da crista do talude, assim como descendentes pela face do talude, com distâncias regulares de maneira a expulsar rapidamente as águas de escorrência superficial (Ferrer & Vallejo, 2007).

3.5.1.3 Valas de pé de talude

Este tipo de solução é utilizado quando quer-se impedir o acesso às vias de comunicação de blocos de rocha em queda, devido a roturas por cunha, planares ou no surgimento de pequenos tombamentos (Romana M. , 1993). A função principal das valetas de pé de talude, com 1m de largura é a drenagem superficial, podendo também ajudar na retenção de alguns blocos de rocha que precipitem ao longo do talude.

3.5.1.4 Barreiras dinâmicas

As barreiras dinâmicas (Figura 21) são barreiras que tem como função principal conter a queda de blocos, estas estruturas são compostas por diversas componentes, como postes rígidos, cabos de aço, redes de aço de elevada resistência, cabos ancorados, redes de aço triplas, anéis ou elementos de travamento, fixadores tipos braçadeiras, chumbadores, etc.

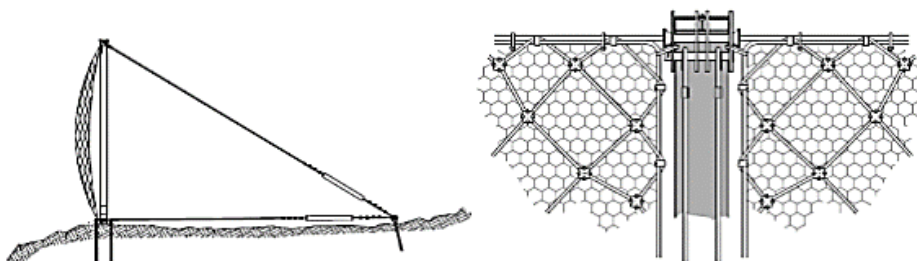


Figura 21 - Corte e alçado tipo de uma barreira dinâmica (adaptado de Rodrigues, 2013)

Este tipo de solução (Barreiras dinâmicas) é utilizado sobretudo na proteção contra a queda de pedras em taludes rochosos, tem como principal característica absorção de impactos. As barreiras dinâmicas, ao contrário das redes que cobrem o talude, são normalmente, colocadas a jusante do taludo rochoso, de maneira a reter os blocos de pedra que possam desprender do mesmo, sendo uma forma de proteção passiva. Este tipo de barreiras tem como principal função controlar os efeitos, em vez de atuar na origem do problema, permitindo que a mesma possa incluir um conjunto grande de inícios de desprendimentos de pedras, este tipo de solução tem como mais-valia a sua integração paisagística.

3.5.2 Reforço com inclusões

3.5.2.1 Pregagens

As pregagens (Figura 22) são uma técnica de reforço do talude, que compreende a introdução de elementos rígidos que reagem passivamente, estes elementos rígidos podem ser varões de aço. Estes mobilizam a força por aderência do varão oferecendo resistência à custa de momentos fletores absorvidos (Floque, 1989). As pregagens funcionam por tração e o reforço advém do aumento da resistência de corte.

Esta técnica de reforço consiste, geralmente na introdução de barras de aço, ou outros metais similares, cobertos por um material ligante, geralmente calda de cimento, que tem como função a resistência a esforços de corte, de tração e momentos fletores causados pelo movimento do terreno (Feijó, 2007).

A técnica de estabilização de taludes designada por pregagens é muito utilizada por todo o mundo e tem como finalidade o reforço deste, sendo adequado para a estabilização de taludes onde ocorram destaques por tombamento, rotura em cunha e planar. Quando verifica-se a existência de destacamento de blocos de dimensões apreciáveis deve-se utilizar pregagens pontuais.

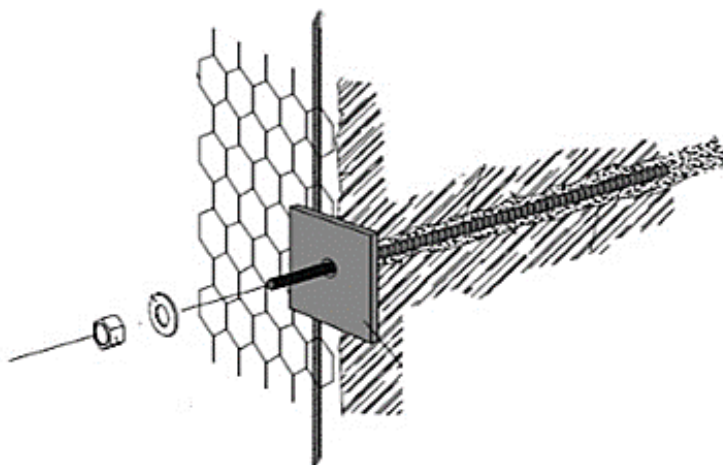


Figura 22 - Desenho tipo de uma pregagem (adaptado de Rodrigues, 2013)

3.5.2.2 Ancoragens

As ancoragens (Figura 23) têm como principal objetivo o reforço do maciço rochoso, assim como as pregagens, porém as ancoragens são constituídas por barras ou cordões de aço de alta resistência, colocados em furos previamente abertos no maciço, que são fixados em zonas estáveis do maciço. O que diferencia estas duas técnicas é aplicação de pré-esforço nas ancoragens para poderem trabalhar à tração, uma ancoragem permite transmitir a uma zona interna do terreno uma carga de tração. A armadura utilizada deve ser protegida contra a corrosão tanto mais quanto maior for a agressividade do meio onde se executa.

Pode-se classificar as ancoragens em três tipos que dependem da sua funcionalidade, sendo elas:

- ❖ Passivas: a ancoragem começa a trabalhar quando ocorre movimento do bloco;
- ❖ Ativas: quando a ancoragem é esticada após a instalação para a sua carga admissível;
- ❖ Mistas: quando a ancoragem é esticada com uma carga inferior à sua carga admissível.

A técnica de ancoragem é utilizada quando pretende-se resolver problemas de rotura planar e grandes tombamentos, sendo uma das técnicas com maior utilidade.

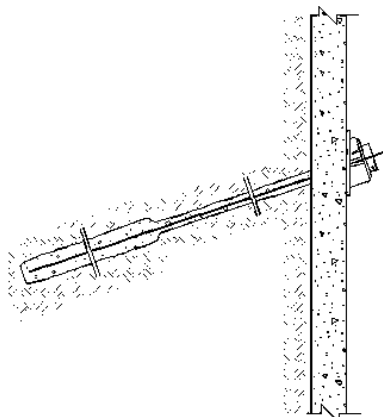


Figura 23 - Desenho tipo de uma ancoragem (Fonte <http://www.qeradordeprecos.info/imagenes/CYA482.jpg>)

3.5.3 Reforço com betão

3.5.3.1 Betão projetado

Pode-se definir o betão projetado como uma mistura pastosa de água, cimento, areia e, muitas vezes, de aditivos que, projetado com o jato possibilita a melhoria das características autoportantes do terreno. Uma das grandes vantagens da utilização do betão projetado é usado especificamente para dispensar a utilização de cofragem, a projeção do betão pode ser executada por via húmida ou via seca.

O betão projetado é utilizado em taludes ou partes de taludes por ser uma solução de rápida execução e com custos aceitáveis, devido a este fator, muitos taludes são revestidos com betão quando surgem

os primeiros sinais de uma possível instabilidade. Um dos aspetos negativos desta tecnologia é o impacto visual na zona, este pode ser minimizado com a utilização de pigmentos na camada final, outro dos problemas associados a esta tecnologia é a degradação da camada de betão com o passar do tempo, devido aos agentes externos (Hudson, 1993).

Em algumas situações, como é o caso de taludes muito fraturados, é utilizado malhas metálicas, na superfície do talude, antes da aplicação do betão projetado, criando assim uma superfície resistente, de modo a ser viável a instalação de pregagens e/ou ancoragens.

De seguida são descritos os cuidados a ter quando pretendemos utilizar betão projetado na superfície do talude (Romana M. , 1993):

- ❖ Limpar a superfície do talude com ar comprimido e água;
- ❖ O betão deve ser projetado em várias camadas, normalmente cada camada tem 5cm;
- ❖ Não tapar qualquer área com drenagem interna natural;
- ❖ Colocar drenos para aliviar as pressões intersticiais.

3.5.3.2 Muros de contenção

Os muros servem como elementos de contenção, que proporcionam um incremento de resistência, sendo eficiente contra ocorrência de instabilidade superficial (González de Vallejo, Ferrer, Ortuno, & Oteo, 2002). Os muros de contenção localizam-se geralmente na zona inferior dos taludes, sendo estruturas de contenção construídas com o intuito de serem elementos resistentes, de contenção.

Um dos grandes inconvenientes da sua construção é a escavação junto da base do talude, favorecendo a instabilidade. Quando tem-se muros de suporte contínuos, um dos grandes problemas é a drenagem, deve-se proporcionar uma boa drenagem interna. Estes muros, ao serem construídos na base do talude, funcionam como um reforço do pé do talude rochoso, apresentando assim uma solução eficaz contra a instabilidade superficial.

Os muros de contenção podem ser flexíveis ou rígidos, conforme se queira estabilizar ou fornecer uma força adicional, existem diversos tipos de muros que apresentam uma série de particularidades que os tornam adequados para os diferentes casos de estabilidade. Alguns dos tipos de muros mais utilizados para os taludes de escavação são:

- ❖ Muros de betão armado;
- ❖ Muros ancorados;
- ❖ Muros de alvenaria;
- ❖ Gabiões.

As condições de fundação são um dos parâmetros a ter em conta quando pretende-se construir um muro, se a fundação apresentar tendência para deformar é conveniente a construção de muros flexíveis (tais como os gabiões), se a fundação for de boa qualidade pode-se executar muros rígidos (de pedra ou betão).

4. CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DO TALUDE SOBRANCEIRO À E.R. 222 NO SÍTIO DA RATEIRA

4.1 Localização

O Sítio da Rateira localiza-se no concelho da Ponta do Sol, junto à estrada regional ER 222, numa zona onde se dá a confluência entre duas linhas de água, a ribeira de S. Tiago e a ribeira de S. João. O talude do Sítio da Rateira situa-se na costa Sul da ilha da Madeira, sobranceiro à estrada ER 222, compreendido entre aproximadamente os kms 158,5 e 159,0 (Figura 24).

Este talude encontra-se dividido em dois trechos independentes, um deles foi designado talude A, com orientação N-S, com cerca de 90 a 100 m de extensão que se desenvolve ao longo de um troço desta estrada com traçado mais ou menos retilíneo, com definição de uma curva apertada no limite final Norte, onde é atravessada por uma linha de água que corresponde à ribeira de S. João. O outro talude, designado por talude B, tem início logo a seguir a esta linha de água com uma orientação sensivelmente WNW-ESE, com cerca de 100 m de desenvolvimento e é delimitado, no lado oposto, por uma outra linha de água, que corresponde à ribeira de S. Tiago.

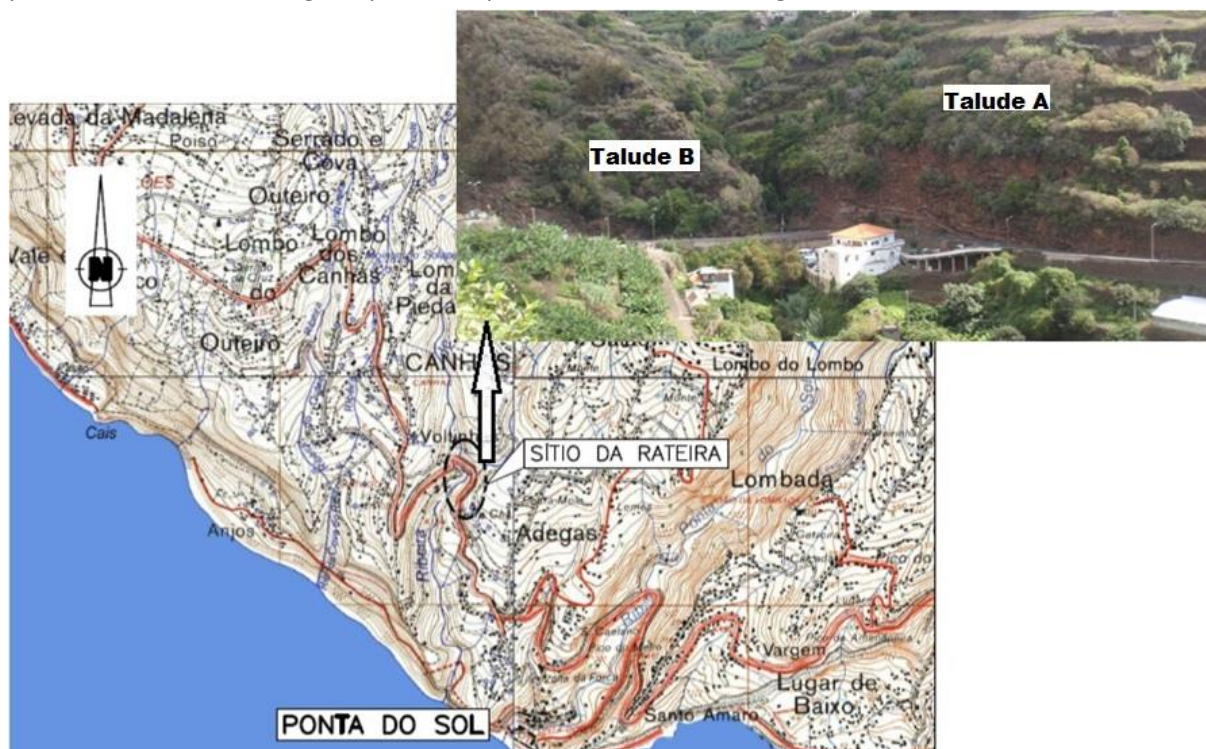


Figura 24 - Localização da área de estudo

4.2 Trabalhos de campo

Para cada um dos taludes estudados, obteve-se os parâmetros físicos e geométricos através de inúmeras observações realizadas no local, assim como o recurso a fotos tiradas ao longo do processo de reconhecimento. A determinação da altura aproximada para cada um dos taludes rochosos foi realizada mediante as relações geométricas entre a inclinação do talude e a sua extensão média sobre a face do talude. Para cada uma das medições utilizou-se a fita graduada ou, quando necessário, recorreu-se a uma régua graduada.

Ao longo dos taludes rochosos pode-se observar a presença de alguma vegetação arbustiva de médio a pequeno porte, sobretudo no topo, como pode-se verificar pela enorme presença de ervas na abertura de algumas descontinuidades. É de salientar que junto à base do Talude A, pode-se verificar a presença de algumas zonas húmidas, com musgos, denunciando a presença de água. Na Tabela 29 resume-se as principais características de ambos os taludes, em estudo.

Tabela 29 - Resumo dos dados relevantes para cada um dos taludes

Taludes	Extensão (m)	Altura máxima (m)	Orientação	Vegetação	Presença de água
Talude <u>A</u>	90 a 100	20 a 25	N-S	Vegetação arbustiva de pequeno e médio porte; Presença de Raízes	Algo húmida a húmida, junto à base
Talude <u>B</u>	100	10 a 15	WNW-ESE	Vegetação arbustiva de pequeno porte	Seco

Um dos principais objetivos é fazer a caracterização para ambos os taludes, para isso efetuou-se o registo, no terreno, dos parâmetros descritos por Romana (1985) e Bieniawski (1970). Para cada uma das famílias de descontinuidades, presentes no talude, executou-se a medição do espaçamento, da orientação, da persistência, da abertura e do preenchimento, através da observação “*in situ*”. Cada um dos parâmetros, anteriormente descritos, foram posteriormente tratados para o cálculo dos valores das classificações RMR e GSI, para cada um dos taludes.

Na elaboração deste trabalho tentou-se seguir, sempre que possível, os procedimentos normais e terminológicos em qualquer obra de Engenharia Civil e em estudos geotécnicos, a saber:

- ❖ As teorias e procedimentos de campo propostos pela ISRM (1978, 1981), Ferrer & González (2007), GSE (1995) e Hoek (2006);
- ❖ O Eurocódigo 7, projeto geotécnico;
- ❖ A BGD (“Basic Geotechnical Description of Rock Masses”) proposto pela ISRM (1981), para a caracterização geológica e geotécnica da compartimentação do maciço.

4.3 Características gerais dos taludes

O talude A é constituído por um talude com cerca de 20 a 25 m de altura com inclinação muito próxima da vertical, embora apresente também várias zonas com inclinações negativas que resultaram, em parte, da escavação realizada ao longo da sua base para a inserção da ER 222. Acima deste talude existe um outro, com inclinação mais suave, que se encontra quase sempre coberto por uma densa vegetação. A altura aproximada deste talude, desde a estrada situada na base até ao topo, na zona onde existe uma vereda com uma levada na base de um muro em pedra, que definirá o limite, é de cerca de 40 a 50 m (Figura 25).



Figura 25 - Vista geral do talude A

O talude B é constituído também por um primeiro talude com cerca de 10 a 15 m de altura com inclinação subvertical, transitando para um talude suave com declive da ordem dos 25 a 30°. Na transição entre estes dois taludes subsiste uma densa cobertura vegetal, constituída por vários tipos de vegetação, onde sobressaem algumas árvores de grande porte. O limite inferior do talude é definido pela plataforma da ER 222, a qual tem um perfil misto em escavação/aterro (Figura 26).



Figura 26 - Vista geral do talude B

4.4 Caracterização geológica e geotécnica

Em obras de carácter geotécnico é essencial que seja levado a cabo um reconhecimento geológico e geotécnico. Este reconhecimento tem como principal função estimar as características dos maciços rochosos afetos a tais obras, assim as suas particularidades vão condicionar a dimensão e os custos deste tipo de obras.

De seguida, apresenta-se todas as características geológicas e geotécnicas associadas a cada um dos taludes em estudo. Sendo essas características descritas através de vários parâmetros, entre eles a geologia local, as condições tectónicas-estruturais e as condições hidrogeológicas.

4.4.1 Enquadramento geomorfológico

O Sítio da Rateira trata-se de uma zona caracterizada por uma morfologia muito acidentada, que foi fortemente condicionada pela instalação dos vales destas ribeiras, os quais, são muito encaixados e profundos. Ambos os taludes em estudo devem-se às escavações que foram realizadas aproximadamente no terço inferior de cada encosta para a implantação da ER 222, e que originaram taludes subverticais com alturas compreendidas entre aproximadamente 10 e 25 m.

Estes dois taludes foram talhados no Complexo Vulcânico Pós-Miocénico (β_2) (Figura 27), formado por alternâncias de escoadas de lavas basálticas geralmente compactas e resistentes, mas por vezes, muito fraturadas com níveis de materiais piroclásticos brechóides mais brandos e friáveis. Interestratificados nestas formações, podem ainda ocorrer, por vezes, níveis de tufos com formas geralmente lenticulares e com contornos irregulares.

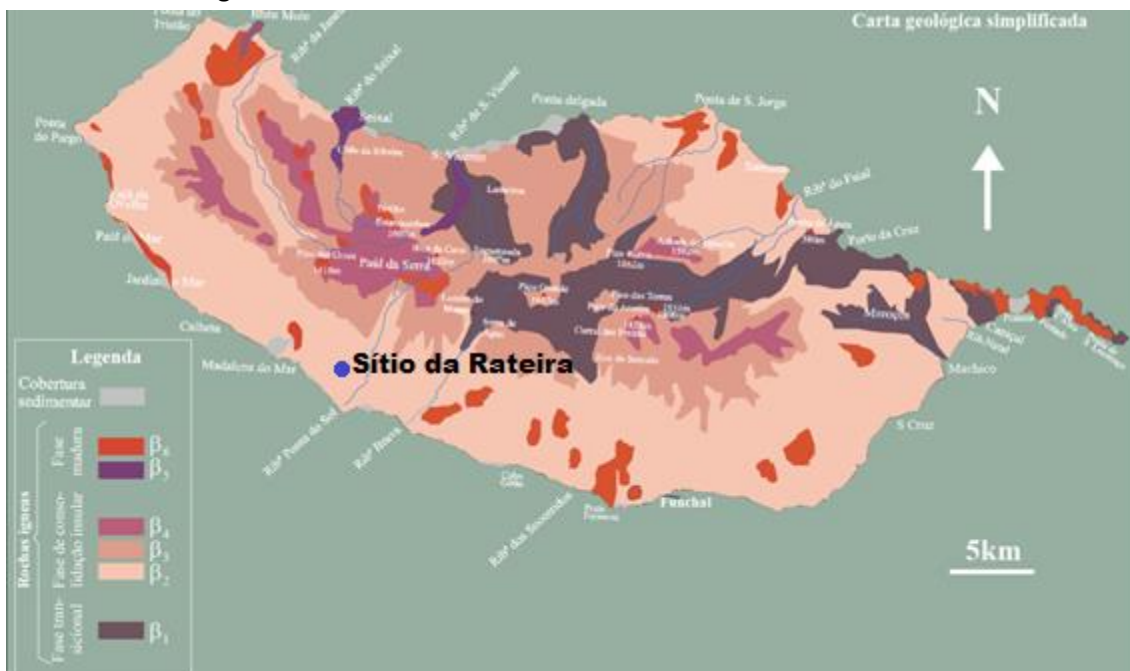


Figura 27 - Carta geológica simplificada (adaptado de Ribeiro & Ramalho, 2007)

No talude A, verifica-se que da base, ao nível da estrada, até cerca de 20 a 25 m de altura, onde este tem inclinação quase vertical, parece existir alguma predominância das formações basálticas sobre as brechas, embora as escoadas basálticas se apresentem geralmente muito fraturadas. Os níveis de brechas que ocorrem intercalados são geralmente menos espessos e apresentam contornos irregulares e formas lenticulares, por vezes, com variações bruscas de espessura (Figura 28).

No talude A, observam-se várias zonas deprimidas nos níveis de brechas, que formam pequenas cavernas devido à sua erosão pronunciada, em resultado das suas características mais brandas e friáveis. Sobrejacentes a estas zonas, formam-se consolas nas escoadas basálticas, que chegam em alguns casos a atingir cerca de 2 a 3 m dando origem a zonas com inclinações negativas. Ao longo deste talude a espessura das bancadas basálticas varia entre 0,5 e 3 m, enquanto os níveis de brechas têm geralmente espessuras entre 0,3 e 3 m (Figura 28).



Figura 28 - Características do talude A: a) Perspetiva geral do talude A; b) Zonas deprimidas ao longo dos níveis de brechas; c) Predominância das formações basálticas sobre as brechas; d) Brechas intercaladas com basalts.

O talude B apresenta também inclinação subvertical, desde a base, ao nível da estrada, até cerca de 10 a 15 m de altura. Este talude é constituído no extremo WNW por tufo compactos formando um nível bastante espesso, e na restante extensão por escoadas de lavas basálticas fraturadas, intercaladas com níveis de brechas desagregáveis (Figura 29).

No talude B, esta erosão não se apresenta tão acentuada, embora se observe uma maior erosão dos níveis de brechas existentes. Nas escoadas basálticas as consolas são, por isso, menos evidentes, apesar da grande fracturação desta formação existam alguns blocos com evidências de se poderem vir a destacar do maciço.



Figura 29 - Pormenor do talude B

É de salientar, ainda, que o recuo dos níveis mais brandos, acentuando a formação de consolas imediatamente sobrejacentes, tem como consequência o aumento das tensões de compressão paralelas à superfície, conduzindo frequentemente à rotura de parte destas consolas. Este processo de erosão diferencial vai evoluindo e acaba por conduzir ao recuo progressivo dos taludes e a uma certa imposição de um perfil transversal quase vertical.

Conclui-se, assim, que os principais fenómenos que contribuem para os processos de instabilidade são essencialmente de dois tipos:

- ❖ Nos níveis mais brandos, constituídos por brechas facilmente desagregáveis mas que apresentam alguma coesão, os efeitos da meteorização conduzem sobretudo a um processo de queda individual de partículas ou de um conjunto de partículas por efeito da descompressão sofrida pelo maciço.
- ❖ Nas camadas mais rijas e resistentes, onde se formam consolas, os mecanismos de rotura são desmoronamentos de partes de bancadas, desprendimentos e quedas de blocos que se dão fundamentalmente por ação do peso próprio em consequência da fracturação subvertical que afeta estas camadas.

4.4.2 Unidades geológicas

Como já foi anteriormente referido, as formações que constituem os dois taludes em estudo pertencem ao complexo vulcânico Pós-Miocénico β_2 . Com base nos reconhecimentos geológicos de superfície foram individualizadas as unidades geológicas que se apresentam de seguida. Estas foram obtidas a partir das plantas, dos alçados geológicos e da sobreposição das fotografias nos cortes geológicos esquemáticos (**Anexo B**).

Depósitos Recentes:

DC – Depósitos de cobertura: Estes depósitos encontram-se limitados às plataformas formadas por socalcos, que foram na maioria dos casos construídas ao longo de grande parte da extensão dos taludes mais suaves, que se encontram situados acima das zonas escarpadas. São constituídos por solos essencialmente argilo-siltosos com pequenos fragmentos de rochas basálticas dispersos e algumas raízes no horizonte mais superficial. Têm cor acastanhada e estima-se que a sua espessura alterne entre cerca de 1 e 3 m.

Complexo Vulcânico Pós-Miocénico β_2 :

β – Basaltos: Correspondem a uma formação muito compacta e de elevada resistência, englobando-se nesta unidade todas as variações graduais para os basaltos vacúolares e brechóides, exibindo no conjunto cor cinzenta acastanhada escura. Apresentam-se pouco a medianamente alterados (W_{2-3}) e com fraturas medianamente afastadas a próximas (F_{3-4}), podendo localmente ocorrer ainda mais fraturados, com fraturas próximas a muito próximas (F_{4-5}). No talude A é frequente algumas destas escoadas terem contornos muito irregulares e interrupções bruscas de continuidade. No talude B estas escoadas parecem ter mais continuidade e apresentam maior espessura. Nos dois taludes a espessura destas bancadas deverá variar entre cerca de 0,5 e 3m.

Br – Brechas: As brechas vulcânicas resultaram da acumulação de produtos de calibre variável, geralmente entre 2 e 8 cm de diâmetro, apresentando-se muito vacúolares e heterogéneas. Caracterizam-se por terem granulometria muito grosseira, grande permeabilidade e se desagregarem com relativa facilidade quando expostas aos agentes atmosféricos. Trata-se de uma formação de média a baixa resistência. Estão geralmente medianamente a muito alteradas (W_{3-4}) e têm cor acastanhada. Ocorrem praticamente ao longo de grande parte da altura dos dois taludes escarpados intercaladas com os basaltos. Estes níveis têm espessuras quase sempre entre 0,3 e 3 m, e apresentam formas lenticulares e contornos irregulares com variações bruscas de espessura.

T – Tufos: Os tufos que ocorrem apenas no extremo WNW do talude B correspondem à acumulação de produtos de granulometria fina a média, emitidos pelos centros eruptivos vizinhos e que foram transportados pelo vento. Apresentam-se homogéneos e de natureza silto-arenosa e silto-argilosa, medianamente alterados (W_3) e com cor amarelada a avermelhada. Trata-se também de uma formação de baixa resistência. A espessura deste nível é de cerca de 8 a 10 m.

4.4.3 Condições tectónico-estruturais

Nesta zona ocorrem três tipos de rochas que resultaram da emissão de produtos vulcânicos diversos, resultantes de um vulcanismo fissural localizado a Norte da zona em estudo. As brechas e os tufos correspondem a projeções grosseiras e finas, emitidas pelos aparelhos vulcânicos. Os basaltos

correspondem a derrames de escoadas lávicas que desceram ao longo das vertentes dos aparelhos vulcânicos, do interior da ilha para o mar.

As escoadas de lavas basálticas apresentam, por isso, uma inclinação geral para Sul e SW, ou seja, na direção perpendicular aos taludes, observando-se ainda um aumento gradual da espessura do interior para a periferia dos maciços, o que lhes confere uma forma lenticular. Estas escoadas apresentam-se geralmente diaclasadas, com descontinuidades predominantemente verticais ou subverticais, com espaçamento compreendido entre 0,5 e 2 m, superfícies onduladas, que dão origem à formação de blocos com formas alongadas e com secção transversal irregular.

Para além desta família de diáclases, existe também uma outra família de diáclases sub-horizontais, provavelmente originadas devido à deposição faseada das escoadas e respetivas condições de arrefecimento. Da ação conjunta destes sistemas de diáclases subverticais e sub-horizontais individualizam-se, na superfície das escoadas basálticas, blocos com forma mais ou menos paralelepípedica. Este aspeto encontra-se bem marcado nas escoadas basálticas que constituem o talude A.

Quanto aos níveis de brechas que ocorrem intercalados com os basaltos, verifica-se que são menos resistentes e mais erodíveis. Estas formações apresentam-se quase sempre mais erodidas, devido à ação dos agentes atmosféricos e das águas que percolam através destes níveis, dando origem a zonas em depressão, que vão descalçando progressivamente as bancadas de basalto que se encontram sobrejacentes, evoluindo assim para uma situação que favorece a queda de blocos ou mesmo de partes de bancadas.

Esta erosão deu origem à formação de pequenos patamares entre as bancadas basálticas, tendo-se formado com o tempo várias zonas com consolas que variam geralmente entre 0,5 e 1 m. No entanto, junto ao extremo NE do talude A, existe uma zona em consola pronunciada, com cerca de 3 a 4 m, que originou um trecho com inclinação negativa.

4.4.4 Condições hidrogeológicas

As condições hidrogeológicas dos taludes são condicionadas essencialmente por dois fatores, um relacionado com o tipo de formações que os constituem, e o outro dependente da área total de infiltração que está disponível no topo de cada talude.

No que diz respeito ao primeiro aspeto, verifica-se que existem condições para que as águas possam circular através das fraturas que se encontram abertas nas escoadas basálticas e dar origem ao aparecimento de ressurgências temporárias nas superfícies dos taludes, sempre que são encontrados níveis de menor permeabilidade. Os tufos mais finos (silto-argilosos), mais alteráveis e argilificados, apresentam geralmente reduzida permeabilidade, pelo que podem potenciar a criação de condições favoráveis à ocorrência de níveis de água escalonados a diferentes cotas.

Nos dois taludes em estudo, embora não tenham sido detetadas ressurgências de água franca, existem algumas zonas onde a vegetação é mais abundante o que leva a supor que o seu desenvolvimento esteja relacionado, no mínimo, com a existência de uma maior humidade.

Nas duas linhas de água que ocorrem no local entre os dois taludes, verifica-se que os caudais são significativos e permanentes. Este aspeto leva a admitir que existe uma grande infiltração em profundidade, pelo menos até à cota destas linhas de águas, as quais são bastante entalhadas e profundas.

4.5 Estado atual dos taludes

De acordo com o que foi anteriormente exposto, verifica-se que os problemas que afetam os dois taludes estão essencialmente relacionados com a individualização e queda de blocos associados às escoadas de lavas basálticas e à erosão dos níveis mais brandos e friáveis que correspondem aos materiais piroclásticos brechóides e aos tufos vulcânicos.

No talude A, observa-se de forma generalizada, a existência de pequenas consolas de basaltos, com cerca de 0,5 a 1 m, e de pequenas cavernas e zonas mais deprimidas nos níveis de brechas. As zonas mais deprimidas que formam cavernas mais pronunciadas situam-se ao nível da base do talude. É também ao longo desta zona que existem as maiores consolas, podendo algumas delas atingir perto de 2 m (Figura 28). No extremo Sul, verifica-se, ainda, que este já se encontra com uma inclinação negativa, devido à existência de uma zona em consola, com cerca de sensivelmente 15 a 20 m da base. A consola máxima nesta zona chega a ter próximo de 3 m (Figura 28).

Na parte central do talude, próximo do topo, onde se faz a transição para a zona com declive mais suave que se encontra coberta por densa vegetação, observa-se uma caverna com alguma expressão que resultou da erosão de um nível de brechas. Trata-se de uma zona onde as consolas nos basaltos atingem também aproximadamente 2 m.

Para além destas zonas mais particulares e que levantam maior atenção, verifica-se que ao longo de todo este talude existem vários blocos, de dimensões diversas, bem como consolas, que apresentam elevado risco de poderem vir a desprender-se a curto/médio prazo da superfície do talude e a atingir a ER 222 onde circulam com frequência veículos e pessoas.

No talude B, verifica-se que os problemas relacionados com a erosão diferencial se encontram especialmente concentrados no lado ESE, que confina com a ribeira de S. João. Nesta zona, onde o maciço rochoso é constituído por uma alternância de escoadas de lavas basálticas e níveis de brechas mais desagregáveis, observam-se vários blocos e consolas nos basaltos com potencial risco de queda. Neste extremo, as escoadas basálticas apresentam-se muito fraturadas, observando-se em algumas delas fraturas muito abertas, o que aliada à dimensão de algumas das consolas leva a admitir que se possam vir a originar desprendimentos de blocos ou de partes destas bancadas a curto/médio prazo (Figura 29). No lado WNW, constituído integralmente por tufos compactos, observa-se uma certa

erosão ao longo de alguns destes níveis de menor resistência. É também nesta zona que ocorrem de vez em quando alguns desprendimentos que se depositam junto à berma da ER 222.

4.6 Descrição dos parâmetros das classificações geomecânicas

4.6.1 Caracterização das descontinuidades

Inicialmente foi efetuada uma recolha de informação geológica de base, geológico-estrutural e especialmente litológica. Posteriormente, na fase de reconhecimento “*in situ*”, realizou-se uma caracterização da compartimentação do talude através do registo das características mecânicas e geométricas das descontinuidades.

A descrição do talude rochoso acarreta um certo grau de subjetividade que se deve evitar, efetuando observações sistemáticas e utilizando um processo padronizado. Os parâmetros geológicos e geotécnicos de cada um dos taludes (talude A e talude B) foram obtidos através de uma análise individual, donde se registaram as características de inúmeras descontinuidades. As características recolhidas “*in situ*”, foram analisadas de forma a descrever os seguintes parâmetros: estado de alteração, estado de fracturação, espaçamento, continuidade, abertura, material de preenchimento, rugosidade e presença de água. De seguida faz-se uma descrição, para cada um dos taludes, das características apresentadas pelas descontinuidades.

Estado de fracturação:

Os dados recolhidos “*in situ*”, através da observação da superfície visível dos taludes rochosos, permitiu tratar os dados de forma a obter o número de famílias de descontinuidades e, principalmente, conhecer as famílias dominantes.

O talude A e o talude B apresentam uma fracturação muito intensa, geralmente diaclasadas, com descontinuidades predominantemente verticais ou subverticais. As descontinuidades são essencialmente diáclases, estas apresentam duas direções principais, subverticais e sub-horizontais, em resultado do apertado e muito intenso diaclasamento presente, assim como do preenchimento e espaçamento observado entre as várias diáclases contíguas.

Espaçamento e espessura das camadas (Tabela 6):

O comportamento geomecânico dos taludes rochosos é condicionado sobretudo pelo espaçamento entre descontinuidades, especificamente na presença de diáclases. O parâmetro espaçamento corresponde ao espaço entre duas descontinuidades contíguas de uma mesma família. Tendo como principal objetivo caracterizar o espaçamento presente num sistema de descontinuidades, este foi

efetuado através de numa abordagem quantitativa e qualitativa, permitindo calcular o valor do espaçamento.

Pode-se definir os taludes, quanto à sua qualidade geotécnica, como sendo predominantemente fraturada. No que se refere ao espaçamento entre descontinuidades, estas podem ser classificadas como medianamente afastadas (F_3), tendo localmente fraturas próximas (F_4), de acordo com os critérios da ISRM (1978, 1981).

A espessura das bancadas de basalto presentes no talude A variam entre 0,5 e 3 metros (L_{1-2}), o que corresponde a camadas espessas a muito espessas, segundo a classificação da ISRM (1978, 1981). Já as camadas de brechas têm uma espessura variável entre 0,3 e 2 metros (L_{2-3}), correspondendo a camadas moderadamente espessas a espessas.

Continuidade ou persistência (Tabela 8 e Tabela 19):

A continuidade foi obtida pela medição do comprimento do troço da superfície das descontinuidades, na superfície exposta dos taludes rochosos. A medição da continuidade de uma descontinuidade foi realizada mediante a utilização de uma fita graduada, dando especial atenção as famílias mais extensas, uma vez que são estas que condicionam o tipo de rotura.

Comparativamente à persistência das descontinuidades, estas mostram-se, na sua generalidade, como tendo baixa continuidade, com uma dimensão compreendida entre 1 e 3 metros, no caso do talude A. Ao longo do talude B pode-se observar que as famílias de descontinuidades apresentam uma persistência entre 3 e os 10 metros (continuidade média). Neste talude também pode-se observar a ocorrência de descontinuidades muito pouco a medianamente contínuas.

Rugosidade (Tabela 9 e Tabela 19):

A rugosidade das descontinuidades influencia sobretudo na resistência ao corte, principalmente quando se trata de descontinuidades não preenchidas. A rugosidade das paredes das descontinuidades foi obtida através da comparação visual dos perfis padrão de rugosidade com a rugosidade presente no talude.

No talude A, pode-se observar que a rugosidade é medianamente rugosa (R_3) a muito rugosa (R_{1-2}), o que corresponde a uma superfície de rugosidade geralmente lisa, sendo algumas zonas da superfície das descontinuidades caracterizadas por algo rugosas e, muito raramente, se observa descontinuidades polidas.

Quanto à rugosidade do talude B, observou-se que a rugosidade dominante é pouco rugosa (R_{4-5}), em que as superfícies das descontinuidades são algo rugosas, mas também se observa a ocorrência de algumas superfícies lisas, sendo estas algo raras.

Abertura (Tabela 12 e Tabela 19):

A medição da abertura foi efetuada para cada uma das famílias de descontinuidades presentes no talude rochoso, tendo-se obtido os valores médios para cada uma delas. A abertura de uma descontinuidade varia em função da zona do talude. Algumas das descontinuidades, presentes no maciço, mostram abertura de alguns milímetros à superfície mas podem estar completamente fechadas, em profundidade.

As descontinuidades que compõem os taludes mostram uma abertura muito pouco variável ao longo da superfície do talude podendo considerar como descontinuidades entreabertas. Regra geral, para ambos os taludes em estudo, as descontinuidades mais relevantes possuem uma abertura entre 0,5 e os 2,5 milímetros (abertas), pode-se também encontrar ocasionalmente, em reduzida percentagem, algumas descontinuidades com aberturas superiores a 10 milímetros (muito abertas), de acordo com a classificação das descontinuidades da ISRM (1981).

Material de preenchimento (Tabela 13 e Tabela 20)

O material de preenchimento tem grande influência na resistência ao corte e à deformabilidade. Na caracterização do material que preenche as descontinuidades teve-se em conta a espessura, a natureza dos seus constituintes, a textura e a cor.

Na observação feita no terreno para a cartografia das descontinuidades, verificou-se que uma parte das descontinuidades não possuem qualquer enchimento, existindo contudo, numa percentagem menor, algum enchimento que resulta da desagregação do maciço.

Através da observação feita no terreno, para a caracterização das descontinuidades, pode-se concluir que o talude A apresenta descontinuidades preenchida, sendo o seu preenchimento composto por material resistente e com espessura <5 mm, tendo também sido encontrado descontinuidades preenchidas com raízes e terra vegetal. Já no que se refere ao talude B, o material de preenchimento das descontinuidades é inexistente, pelo que se pode concluir que as descontinuidades são abertas, mas não preenchidas.

Estado de alteração (Tabela 14 e Tabela 20):

O estado de alteração de um talude rochoso é um dos parâmetros mais relevantes a considerar, este permite conhecer o estado de decomposição em que um talude se encontra. O seu levantamento foi efetuado na face do talude com recurso a diversas orientações de modo a caracterizar a área do maciço.

O talude A pode ser classificado como basáltico, visto que este material ocorre em maior percentagem em relação ao material brecha. Segundo a classificação da ISRM (1978, 1981), o estado de alteração do talude A pode ser globalmente, classificado como moderadamente alterado (W_3) e, em algumas

zonas de brechas, como muito alterado (W_4), sendo a percentagem desta reduzida face às restantes. Já no que respeita ao talude B pode-se definir o seu estado de alteração como ligeiramente alterado (W_2), que corresponde a um maciço mais ao menos são, sendo este intersetado por muitas descontinuidades.

Presença de água (Tabela 15):

A importância do efeito da presença da água nas descontinuidades reside geralmente na redução das condições de estabilidade, que resulta do aumento da pressão exercida pela água nas paredes das descontinuidades.

Na totalidade do maciço rochoso que compõe os taludes não se apuraram situações de percolação de água ao longo das superfícies de descontinuidades, sendo que a maior parte das descontinuidades das várias famílias se encontram secas. Verifica-se que algumas das superfícies de descontinuidades se encontram numa situação intermédia entre completamente secas a ligeiramente húmidas, na base do talude A, no limite Norte, junto a ribeira de S. João. Durante o levantamento efetuado, observou-se a ocorrência de descontinuidades húmidas imediatamente após um período de grande precipitação, não sendo esta a situação que ocorre durante a maior parte do tempo.

4.6.2 Resistência do material rochoso

Os parâmetros geotécnicos de cálculo adotados para as formações constituintes do maciço rochoso foram fixados de acordo com a informação geológico-geotécnica existente, bem como, ainda, na experiência adquirida no acompanhamento da obra executada no local, sendo assim necessário procurar obter uma estimativa dos parâmetros de resistência do maciço rochoso competente, esta estimativa teve por base a informação da Tabela 10.

Com base no reconhecimento de superfície efetuado na área em estudo e em especial na face do talude, onde se realça a zona com inclinação negativa existente, definiram-se, os parâmetros necessários. Assim, e não existindo alguma informação relativa a ensaios de característica de resistência mecânica realizados nestas formações na zona envolvente, recorreu-se a valores considerados típicos deste tipo de maciço, referenciados na bibliografia, e ao conhecimento adquirido noutros estudos em formações com características semelhantes.

Dadas as características geológico-geotécnicas das formações interessadas pelos taludes, que constituem um maciço predominantemente rochoso, essencialmente de brechas intercalado com basaltos, considerou-se que o procedimento mais adequado e mais próximo da realidade, seria o de considerar, conservativamente, um valor para a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta de 30 MPa (Perneta, 2010).

Este valor é bastante conservativo, tendo-se desprezado diversos fatores que contribuiriam para uma maior resistência, nomeadamente, um previsível menor grau de fracturação e estado de alteração do

maciço para o interior do talude e um estado de tensão mais elevado associado às superfícies de rotura que atravessam o interior do mesmo.

Tendo em conta os valores dos pesos específicos do material rochoso, de acordo com os resultados obtidos, por outros autores, em ensaios laboratoriais para rochas razoavelmente resistentes, que é o caso em estudo, os valores rondam, normalmente, os 22 KN/m³ (Perneta, 2010).

4.6.3 Determinação do valor de RQD

O índice para quantificar a qualidade da rocha que é designado de RQD foi desenvolvido para fornecer um índice qualitativo do maciço rochoso através de amostras de furos de sondagem. A utilização do RQD como uma medida geomecânica empregue nas classificações de maciços de rochas fraturadas é frequentemente utilizado por duas razões principais: por se tratar de um parâmetro universalmente aceite e, a segunda razão é por ser uma medida facilmente obtida.

Como não foi possível fazer testemunhos de sondagem no local, optou-se por uma análise dos traços das descontinuidades visíveis na superfície do talude. O índice RQD foi estimado a partir do número de descontinuidades por unidade de volume, esta relação foi aplicada ao maciço rochoso através da relação presente na Equação 14, esta permite relacionar o espaçamento entre descontinuidades com o valor de RQD.

Pode-se designar o índice RQD como uma medida do grau de compartimentação do maciço. Para a sua definição é necessário calcular o valor de J_v (Equação 1), este representa o espaçamento das famílias das descontinuidades presentes na face exposta do talude.

A partir do levantamento efetuado “*in situ*” para o talude A, pode-se verificar que as descontinuidades se apresentam medianamente afastadas de acordo com a classificação da ISRM (1981). A partir do cálculo do valor médio do espaçamento entre descontinuidades, determinou-se, à posteriori, o valor de J_v , sendo este de 13,7, este valor foi obtido a partir da Equação 3. Pode-se concluir que o valor de RQD é cerca de 69,8 %, calculado pela Equação 14, que corresponde a um maciço de qualidade razoável (50 – 75 %).

A partir do registo do espaçamento das descontinuidades realizado para o talude B, pode-se verificar que estas apresentam-se medianamente afastadas, já no que se refere à média dos espaçamentos das descontinuidades, estes apresentam-se com uma média superior à do talude A.

Baseado nos cálculos necessárias para a obtenção do valor de RQD, a partir da expressão de Palmstron (1982) (Equação 14), definiu-se o valor do parâmetro de J_v que representa o número de descontinuidades que intersectam um determinado comprimento, através da Equação 3, obtendo-se um valor de 9,6, para o talude B. A partir deste valor foi possível determinar, para o talude B, o valor de RQD sendo este de 83,3 %, este valor foi determinado através da Equação 3. Pode-se concluir que se trata de um maciço com um índice de qualidade bom (75 – 90 %).

4.7 Aplicação das classificações geomecânicas

Um dos parâmetros muito em foco quando pretende-se compreender o comportamento de um talude é a sua estabilidade. Os taludes em maciços rochosos apresentam como principal característica a estudar as discontinuidades, estas condicionam drasticamente o comportamento do talude. Deste modo, é fundamental dar grande atenção às características estruturais dos maciços rochosos, sendo esta fundamental quando se quer compreender o comportamento geomecânico do talude.

Para poder-se aplicar as classificações geomecânicas, anteriormente apresentadas, tem-se presente na Tabela 30 as principais características geológicas e geotécnicas bem como as características das discontinuidades, de cada um dos taludes em estudo.

Tabela 30 - Principais parâmetros geológicos e geotécnicos dos dois taludes

		Talude A	Talude B
Tipo de discontinuidade		Diáclases	Diáclases
Resistência do material rochoso		30 MPa Rocha razoavelmente resistente (S3)	30 MPa Rocha razoavelmente resistente (S3)
Percolação da água		Algo Húmido	Seco
Descontinuidades	Espaçamento	Afastadas a medianamente afastadas (F2 a F3)	Afastadas a medianamente afastadas (F2 a F3)
	Continuidade	Baixa continuidade	Continuidade média
	Abertura	Abertas a medianamente abertas	Parcialmente aberta a abertas
	Rugosidade	Ligeiramente rugosas (R3)	Liso (R4-5)
	Preenchimento	Resistente com espessura < 5mm	Nenhum
	Meteorização	Moderadamente meteorizado (W3)	Ligeiramente meteorizado (W2)

Pode-se designar as classificações geomecânicas como o ato de hierarquizar as características, organizando-as individualmente em classes, sendo que essas classes são associadas a comportamentos diferenciados do meio rochoso. As classificações geomecânicas têm como principal intuito definir a qualidade de um maciço rochoso. As classificações geomecânicas são um instrumento de grande utilidade na elaboração de relatórios geotécnicos, estes relatórios permitem a identificação dos materiais, possibilitando assim uma melhor escolha das técnicas a utilizar no desmonte, assim como na execução mais adequada.

Tendo como principal objetivo efetuar a classificação geomecânica dos taludes rochosos escavados para a implantação da estrada regional 222, no concelho da Ponta do Sol, apresenta-se de seguida a

aplicação das classificações geomecânicas para os dois taludes em estudo, começando pela aplicação da classificação RMR, seguida da classificação GSI.

4.7.1 Classificação RMR

O sistema de classificação geomecânica RMR, aplicado à taludes rochosos, tem por base a obtenção de um índice de qualidade. Esta classificação tem em consideração os seguintes parâmetros: RQD, espaçamento das descontinuidades, resistência à compressão simples, orientação relativa das descontinuidades e a influência da água subterrânea. A partir do valor obtido para a classificação RMR, é possível estimar o tempo de autossustentação de um maciço, assim como propor métodos de suporte.

Na aplicação da classificação RMR, para cada um dos taludes, adotou-se os valores dos pesos tendo em conta as condições observadas e medidas no terreno. Para cada um dos taludes rochosos em estudo realizou-se a determinação dos valores do RMR, tendo em conta cada um dos cinco parâmetros anteriormente referidos. Estes parâmetros encontram-se discriminados na Tabela 30.

Os valores ponderados dos parâmetros da classificação geomecânica RMR encontram-se discriminados na Tabela 31, assim como o somatório de cada um deles, definindo assim o índice de qualidade de cada talude.

Tabela 31 - Valores ponderais dos parâmetros da classificação RMR

Parâmetros		Peso RMR		
		Talude <u>A</u>	Talude <u>B</u>	
1	Resistência da rocha	4	4	
2	RQD	13	17	
3	Espaçamento das descontinuidades	15	15	
4	Descontinuidades	Continuidade	4	2
		Abertura	1	4
		Rugosidade	3	1
		Preenchimento	4	6
		Meteorização	3	5
5	Presença de água	7	15	
TOTAL		54	69	
Classificação		Razoável (III)	Bom (II)	

Perante os resultados obtidos na Tabela 31, que resulta do somatório dos cinco primeiros parâmetros, designado de RMR básico, pode-se afirmar que o talude A tem um índice de qualidade razoável (III), sendo este de inferior qualidade quando comparado com o talude B. Contudo, para o talude B, pode-se concluir que se trata de um maciço de boa qualidade (II).

4.7.1.1 Fator de correção

Após obter o valor do RMR básico, tendo em conta os cinco parâmetros anteriormente calculados, efetuou-se a correção deste valor tendo em conta a orientação das descontinuidades, obtendo-se assim o valor numérico corrigido para a classificação RMR. Este valor numérico vai condicionar o comportamento do talude rochoso, baixando ou mantendo o valor de RMR. A aplicação desta correção tem em conta a orientação das descontinuidades, logo não é uma correção fácil de se aplicar, sendo estas classificadas como favoráveis ou desfavoráveis em relação ao talude.

Depois de uma observação cuidada, e tendo em conta todas as variáveis pode-se concluir que o pendor das descontinuidades vai reduzir drasticamente o valor da classificação RMR, para o talude A. No que se refere ao talude B pode-se verificar que a redução é muito menor, já que este se encontra seco. Todas estas conclusões estão apresentadas na Tabela 32.

Tabela 32 - Fatores de correção

	Orientação das descontinuidades	Tipo de situação	Valor ponderado	RMR corrigido	Classificação
Talude A	Sub-horizontais	Razoável	-25	29	Fraco (IV)
	Sub-verticais	Favorável	-5	49	Razoável (III)
Talude B	Sub-horizontais	Favoráveis	-5	64	Bom (II)
	Sub-verticais	Favoráveis	-5	64	Bom (II)

A determinação dos valores ponderados, para cada um dos taludes, tiveram em conta a Tabela 21. Verifica-se que os valores ponderados para as descontinuidades sub-horizontais são diferentes para os dois taludes, isto deve-se ao facto de se ter observado que a sua orientação constitui um fator de desestabilização para o talude A, já no caso do talude B não se verifica essa proposição.

Na aplicação das correções a classificação RMR pode-se verificar que o talude A situa-se entre fraco a razoável, tendo este reduzido a sua qualidade devido a orientação das descontinuidades sub-horizontais. Apesar de o talude B ter reduzido o valor de RMR manteve-se a qualidade, apresentando uma qualidade boa.

4.7.1.2 Determinação das propriedades do maciço rochoso pelo RMR

A aplicação das classificações geomecânicas a taludes rochosos além de quantificar o talude, em muitas circunstâncias, também facultam uma base de dados para a obtenção de algumas propriedades mecânicas associadas ao maciço, como a resistência e a deformabilidade.

Estimativa do módulo de deformabilidade:

A estimativa do módulo de deformabilidade de um maciço tem grande relevância quando pretende-se implantar um projeto de engenharia. Este parâmetro pode ser estimado através da Equação 4, que relaciona a classificação geomecânica RMR com o módulo de deformabilidade. Assim, o módulo de deformabilidade de um maciço rochoso, quando o RMR > 50, pode ser calculado pela seguinte correspondência:

$$\text{Talude A: } E_M = 2 * RMR - 100 = 2 * 54 - 100 = 8 \text{ GPa}$$

$$\text{Talude B: } E_M = 2 * RMR - 100 = 2 * 69 - 100 = 38 \text{ GPa}$$

Estimativa da coesão e ângulo de atrito:

Para cada classe do maciço rochoso a classificação RMR estabelece um significado, propondo então, um intervalo de valores para as propriedades resistentes do maciço rochoso, o ângulo de atrito e a coesão (Tabela 23) proposta por Bieniawski (1989). Neste caso prático, o talude A foi avaliado como de classe III sendo os valores dessas propriedades compreendidas no intervalo 200 a 300 KPa para a coesão e 25 a 35° para o ângulo de atrito do maciço. O talude B apresenta uma classe superior, sendo esta de classe II, pode-se concluir que as propriedades do maciço vão estar compreendidas entre 300 e 400 KPa para a coesão e 35 a 45° para o ângulo de atrito.

O cálculo direto dos parâmetros geomecânicos do maciço pode ser feito através da abordagem apresentada por Sen e Sadagah (2003), que apresenta equações para o cálculo dos valores do ângulo de atrito (Equação 7) e da coesão (Equação 6). De seguida apresentam-se os resultados da coesão (Equação 6) e do ângulo de atrito (Equação 7):

$$\text{Talude A } \begin{cases} \text{Coesão: } C' = 3,625 * RMR = 3,625 * 54 \approx 196 \text{ KPa} \\ \text{Ângulo de atrito: } \phi' = 25 * (1 + 0,01 * RMR) = 25 * (1 + 0,01 * 54) \approx 39^\circ \end{cases}$$

$$\text{Talude B } \begin{cases} \text{Coesão: } C' = 3,625 * RMR = 3,625 * 69 \approx 251 \text{ KPa} \\ \text{Ângulo de atrito: } \phi' = 25 * (1 + 0,01 * RMR) = 25 * (1 + 0,01 * 69) \approx 43^\circ \end{cases}$$

Comparando os valores dos parâmetros geomecânicos, observa-se que os valores propostos por Bieniawski (1989) são discrepantes quando comparados com os valores obtidos através das equações 6 e 7. O valor de coesão apresenta-se em média mais baixo, já o valor do ângulo de atrito apresenta-se em média mais alto. Tendo em conta essa divergência de resultados é conveniente utilizar os valores sugeridos por Sem e Sadagah (2003), por admitir-se que estes são mais próximos dos valores reais, para o cálculo desses parâmetros.

Estimativa da resistência do maciço rochoso pelo critério de Hoek-Brown:

A partir do índice de qualidade RMR pode-se estimar a resistência do maciço rochoso através do critério de rutura de Hoek-Brown (Ver 3.3.2.1). A partir da Tabela A - 1 (**Anexo A**) admite-se um valor de $m_i = 17$, tendo sido o valor mais baixo entre basaltos e brechas. Como se trata de um maciço rochoso perturbado (talude), admite-se as seguintes equações para o cálculo da resistência:

Talude A:

$$m_b = m_i * e^{\frac{RMR-100}{14}} = 17 * e^{\frac{54-100}{14}} = 0,636$$

$$S = e^{\frac{RMR-100}{6}} = e^{\frac{54-100}{6}} = 0,0005$$

Aplicando a equação do critério de rutura de Hoek-Brown:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_3 + (m_b * \sigma_3 * \sigma_c + S * \sigma_c^2)^a \\ \sigma_1 &= \sigma_3 + (0,636 * \sigma_3 * 30 + 0,0005 * 30^2)^{0,5} \\ \sigma_1 &= \sigma_3 + (19,08 * \sigma_3 + 0,45)^{0,5}\end{aligned}$$

Pode-se definir a resistência à compressão uniaxial do maciço, quando $\sigma_3 = 0$:

$$\sigma_{cm} = \sqrt{0,45} = 0,67 \text{ MPa}$$

Talude B:

$$m_b = m_i * e^{\frac{RMR-100}{14}} = 17 * e^{\frac{69-100}{14}} = 1,857$$

$$S = e^{\frac{RMR-100}{6}} = e^{\frac{69-100}{6}} = 0,006$$

Aplicando a equação do critério de rutura de Hoek-Brown:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_3 + (m_b * \sigma_3 * \sigma_c + S * \sigma_c^2)^a \\ \sigma_1 &= \sigma_3 + (1,857 * \sigma_3 * 30 + 0,006 * 30^2)^{0,5} \\ \sigma_1 &= \sigma_3 + (55,71 * \sigma_3 + 5,4)^{0,5}\end{aligned}$$

Pode-se definir a resistência à compressão uniaxial do maciço, quando $\sigma_3 = 0$:

$$\sigma_{cm} = \sqrt{5,4} = 2,33 \text{ MPa}$$

4.7.2 Classificação GSI

Uma das primeiras avaliações consiste em conhecer se os danos ou falhas visíveis no talude fazem parte da estrutura natural ou se têm outra origem, já que a diferença entre estas extensões é considerável. Uma vez que os valores do GSI são valores estimados, é de esperar que na obra se encontre alguma variação deste valor.

Os valores do Índice de Resistência Geológica (GSI) foram definidos para cada um dos taludes em estudo, tendo em conta o maciço em que se introduzem. O maciço rochoso foi considerado como um todo, não sendo dividido em zonas geológicas, já que as características do talude são semelhantes ao longo deste.

O talude A é constituído essencialmente por brechas e basaltos. Tendo em conta a Figura 30, pode-se circunscrever e representar o maciço que compõem o talude A pelas siglas VB/F, caracterizado por uma estrutura constituída por bastantes blocos interconectados (VB) e uma qualidade razoável (F). De acordo com a Figura 17, essa área corresponde a valores entre 38 e 53 aproximadamente. Já o talude B é constituído essencialmente por basaltos. O maciço onde se introduz o talude B pode ser definido pelas siglas VB/VG, descrito por uma estrutura composta por bastantes blocos interconectados (VB) e uma qualidade bastante boa (VG). Tendo por base a Figura 17, essa área corresponde ao intervalo de valores entre 55 e 73 aproximadamente.

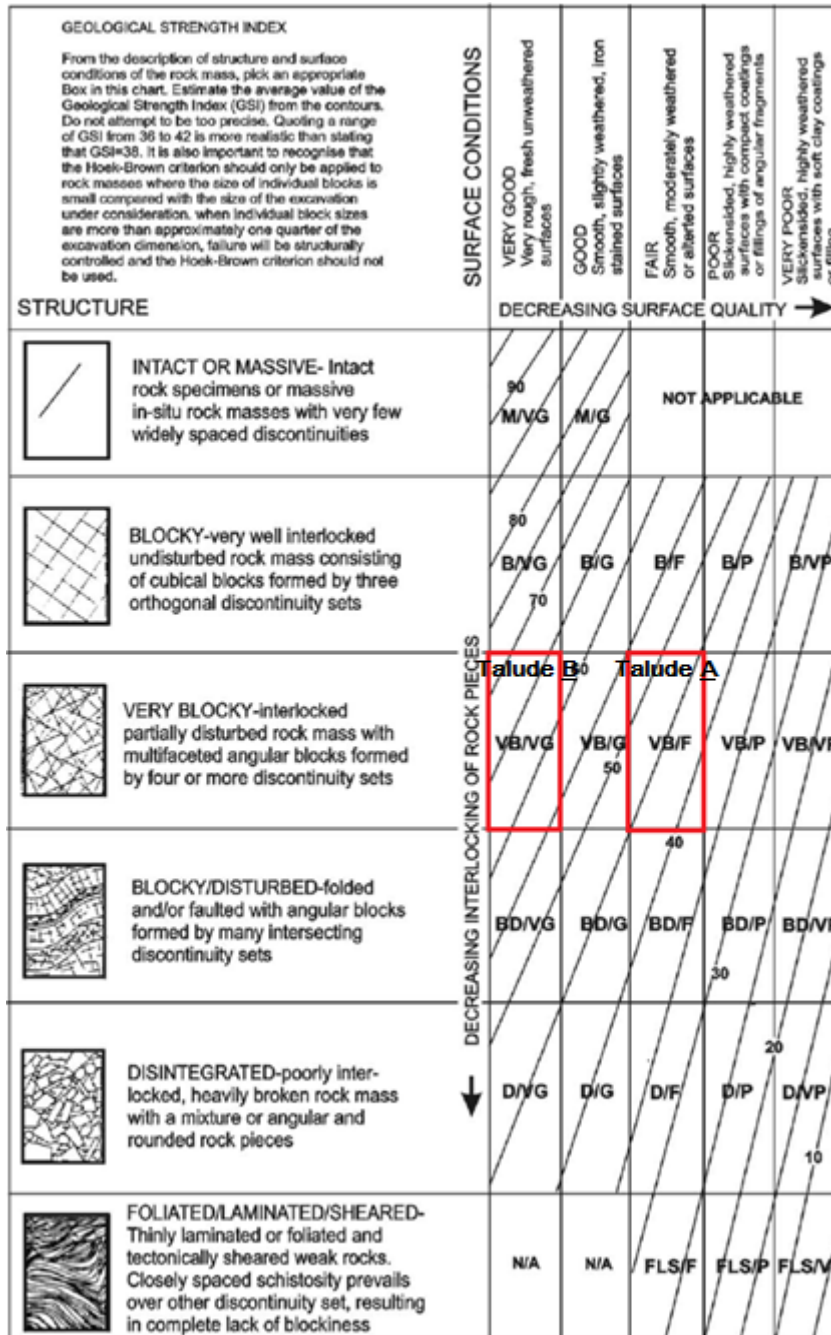


Figura 30 - Índice GSI baseado na estrutura e condições das discontinuidades (Maia P. A., 2011)

O valor de GSI também pode ser obtido através da relação existente entre a classificação RMR e a classificação GSI. Para se definir o índice de qualidade GSI foi estabelecido uma relação, de acordo com a Equação 16, para valores de RMR ≥ 23 . Desta forma, a Tabela 33 revela os valores do Índice de Resistência Geológica (GSI) para os dois taludes rochosos. Pode-se verificar que ambos os valores encontram-se no intervalo definido anteriormente.

Tabela 33 - Classificação GSI

	RMR	GSI
Talude A	54	54-5=49
Talude B	69	69-5=64

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 33, para a classificação GSI, o maciço do talude A tem um índice de qualidade razoável já que o valor da classificação GSI se situa no intervalo 36 a 55 (Tabela 25). No que se refere ao talude B pode-se concluir que este apresenta um bom índice de qualidade, estando compreendido no intervalo 56 a 75 (Tabela 25).

A partir do índice GSI pode-se definir algumas propriedades do maciço, de seguida apresenta-se o critério de rotura de Hoek-Brown que pode ser estimado a partir das seguintes relações (Equação 17; Equação 18; Equação 19), considerando um valor de $m_i = 17$ e $D = 0,9$ (maciço bastante alterado):

Talude A:

$$m_b = m_i * e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14*D}\right)} = 17 * e^{\left(\frac{49-100}{28-14*0,9}\right)} = 0,620$$

$$S = e^{\frac{GSI-100}{9-3*D}} = e^{\frac{49-100}{9-3*0,9}} = 0,0003$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} * \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} * \left(e^{\frac{-49}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) = 0,506$$

Aplicando a equação do critério de rotura de Hoek-Brown:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_b * \sigma_3 * \sigma_c + S * \sigma_c^2)^a$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (0,620 * \sigma_3 * 30 + 0,0003 * 30^2)^{0,506}$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (18,59 * \sigma_3 + 0,27)^{0,506}$$

Pode-se definir a resistência à compressão uniaxial do maciço, quando $\sigma_3 = 0$:

$$\sigma_{cm} = 0,27^{0,506} = 0,516 \text{ MPa}$$

Talude B:

$$m_b = m_i * e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14*D}\right)} = 17 * e^{\left(\frac{64-100}{28-14*0,9}\right)} = 1,641$$

$$S = e^{\frac{GSI-100}{9-3*D}} = e^{\frac{64-100}{9-3*0,9}} = 0,0033$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} * \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} * \left(e^{\frac{-64}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) = 0,502$$

Aplicando a equação de Hoek-Brown:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m_b * \sigma_3 * \sigma_c + S * \sigma_c^2)^a$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (1,641 * \sigma_3 * 30 + 0,0033 * 30^2)^{0,502}$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (49,24 * \sigma_3 + 2,97)^{0,502}$$

Pode-se definir a resistência à compressão uniaxial do maciço, quando $\sigma_3 = 0$:

$$\sigma_{cm} = 2,97^{0,502} = 1,727 \text{ MPa}$$

ANÁLISE DE ESTABILIDADE E TÉCNICAS APLICADAS NA ESTABILIZAÇÃO DO TALUDE SOBRANCEIRO À E.R. 222 NO SÍTIO DA RATEIRA

5.1 Análise de estabilidade com o Software

A análise de estabilidade de taludes pode ser efetuada com o auxílio de programas informáticos desenvolvidos com essa finalidade. A estabilidade do talude rochoso em análise vai ser determinada com recurso ao *software* SLIDE 6.0 desenvolvido pela Rocscience Inc Toronto, Canadá. Este *software* efetua análise de estabilidade de taludes em 2D, baseando-se no método de equilíbrio limite, através do cálculo do fator de segurança para superfícies de rotura não circulares ou circulares em taludes rochosos ou solos (Rocscience, 2016).

O *software* SLIDE 6.0 revela-se de simples utilização, isto deve-se à fácil introdução dos parâmetros de entrada (geometria do talude e parâmetros de resistência do maciço). Uma das grandes vantagens deste *software*, prende-se com a automatização da localização das superfícies de corte críticas e o cálculo dos respetivos fatores de segurança condicionantes. Os resultados do cálculo pelo programa SLIDE 6.0 surgem da aplicação de vários métodos entre eles Bishop, Spencer e Janbu simplificado entre outros, para a comparação dos vários fatores de segurança e confirmação da estabilidade. Nas análises feitas não se considerou a percolação de água no maciço, isto deveu-se ao facto de não existir ensaios que permitisse definir, com algum grau de rigorosidade, o nível freático. Os basaltos com fraturas horizontais, porém sem grande continuidade lateral embora possam ter permeabilidade elevada localmente, não beneficiam a circulação da água. Ao longo do processo de verificação da estabilidade, adotou-se um nível freático, verificou-se que a influência seria diminuta, optou-se assim por não considerar o nível freático no talude.

5.1.1 Parâmetros geomecânicos para o talude A

Dadas as características geológico-geotécnicas das formações interessadas pelo talude, que constituem um maciço predominantemente rochoso, essencialmente de basaltos intercalado com brechas, considerou-se que o procedimento mais adequado e mais próximo da realidade, seria o de considerar superfícies de rotura planares. As roturas planares são admitidas em taludes ingrimés, como é o caso do talude em análise. Também procurou-se, durante as análises de estabilidade, comparar os fatores de segurança da rotura circular com a rotura planar, chegando-se a conclusão que os valores seriam inferiores para a rotura planar. Admite-se que a massa de deslizamento desloca-se como um corpo rígido.

Os parâmetros geotécnicos de cálculo adotados para as formações constituintes do maciço rochoso foram fixados de acordo com a informação geológico-geotécnica existente. Contudo, tendo em consideração as características particulares deste talude, envolvendo a estabilidade de um talude com altura de cerca de 45 m, foi necessário variar os parâmetros resistentes do maciço rochoso competente, os quais permitissem compreender a variação do fator de segurança ao longo dos diferentes materiais geológicos. Assim, e não existindo informação relativa a ensaios de caracterização da resistência mecânica realizados nestas formações na zona envolvente da obra, recorreu-se a valores considerados típicos deste tipo de maciço.

Dada a complexidade do estudo, aliada à altura do talude, a análise da estabilidade global foi feita para três cortes, ao longo da extensão do talude: Corte 1-1, Corte 2-2 e Corte 3-3, cada um destes cortes foi efetuado no perfil topográfico do maciço sendo apresentado no **Anexo C**. Estes três perfis foram escolhidos como sendo os mais desfavoráveis, e representando todas as variações que ocorrem ao longo do talude A.

Tendo em conta os cortes ilustrados no **Anexo C** (Corte 1-1, Corte 2-2 e Corte 3-3), foram introduzidas algumas alterações na estrutura dos seus estratos e na geometria do talude natural de forma a facilitar a entrada de coordenadas no programa SLIDE 6.0. Nestas simplificações adotou-se uma alteração da geometria do talude e dos estratos, passando a considerar um só estrato. Foi descorado o nível freático, devido aos fatores referidos anteriormente.

O talude em análise é composto por um estrato de rocha e uma geometria sensivelmente próxima da real. Tendo em conta as simplificações aplicadas ao nível dos estratos do maciço, optou-se por fazer uma análise paramétrica, com o intuito de compreender melhor a variação do fator de segurança para os diversos materiais presentes no maciço. Assim os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) representativos do local serão escolhidos tendo em conta as formações presentes ao longo do maciço. Ao introduzir esta análise pode-se verificar a influência dos parâmetros no fator de segurança, tendo presente a verificação da segurança para os casos extremos que possam vir a existir, no local.

5.1.2 Análise paramétrica para o talude A

À análise de estabilidade feita ao talude, teve como primeiro intuito analisar os três cortes geológicos que compõem o talude A, obtendo-se assim os F.S. para cada um dos casos admitidos. Numa segunda fase fez-se uma análise de sensibilidade dos parâmetros resistentes coesão e ângulo de atrito, procurando compreender de que forma varia o F.S. com o aumento dos parâmetros resistentes. Pode-se assim concluir, que a análise foi dividida em duas fases:

- ❖ 1ª Fase: Análise de estabilidade do talude A;
- ❖ 2ª Fase: Análise de sensibilidade dos parâmetros resistentes;

Tendo em conta a caracterização feita anteriormente e considerando as características geológico-geotécnicas das formações interessadas pelo talude A, que constituem um maciço predominantemente rochoso, essencialmente de basaltos intercalado com brechas, foram admitidos

vários pontos de análise. Cada ponto de análise teve em conta a descrição geológica local, adotando-se nesta análise paramétrica nove interações, de acordo com a Tabela 34.

Esta análise consistiu em variar cada parâmetro de referência, tendo sempre em conta a informação geológica do maciço. Cada análise procurou-se definir o fator de segurança, procurando compreender a estabilidade do talude.

No maciço rochoso pode-se encontrar dois tipos diferentes de materiais rochosos, sendo eles brechas e basaltos. Dividindo a análise do talude em três casos baseados na geologia presente no local, são eles:

- ❖ **Caso 1** – maciço composto por brechas medianamente alteradas;
- ❖ **Caso 2** – maciço intermedio;
- ❖ **Caso 3** – maciço composto por basaltos muito alterados.

Dentro de cada caso procurou-se variar os parâmetros de coesão e ângulo de atrito, de forma a compreender a sua influência no fator de segurança. Cada caso foi subdividido em três distintas análises, com essas análises pretende-se encontrar os fatores de segurança representativos da qualidade do maciço.

Resumidamente, pode-se definir a análise do talude da seguinte forma, três casos de estudo (**Caso 1**, **Caso 2** e **Caso3**), em que cada caso foi subdividido em três análises cada (**Análise i.1**, **Análise i.2** e **Análise i.3**), pode-se observar isto na Tabela 34.

Todos os parâmetros resistentes adotados para cada análise, foram retirados da Figura 31, onde se apresenta um gráfico com a relação ϕ/c para as várias formações da Ilha da Madeira (Cenorgeo, 2010).

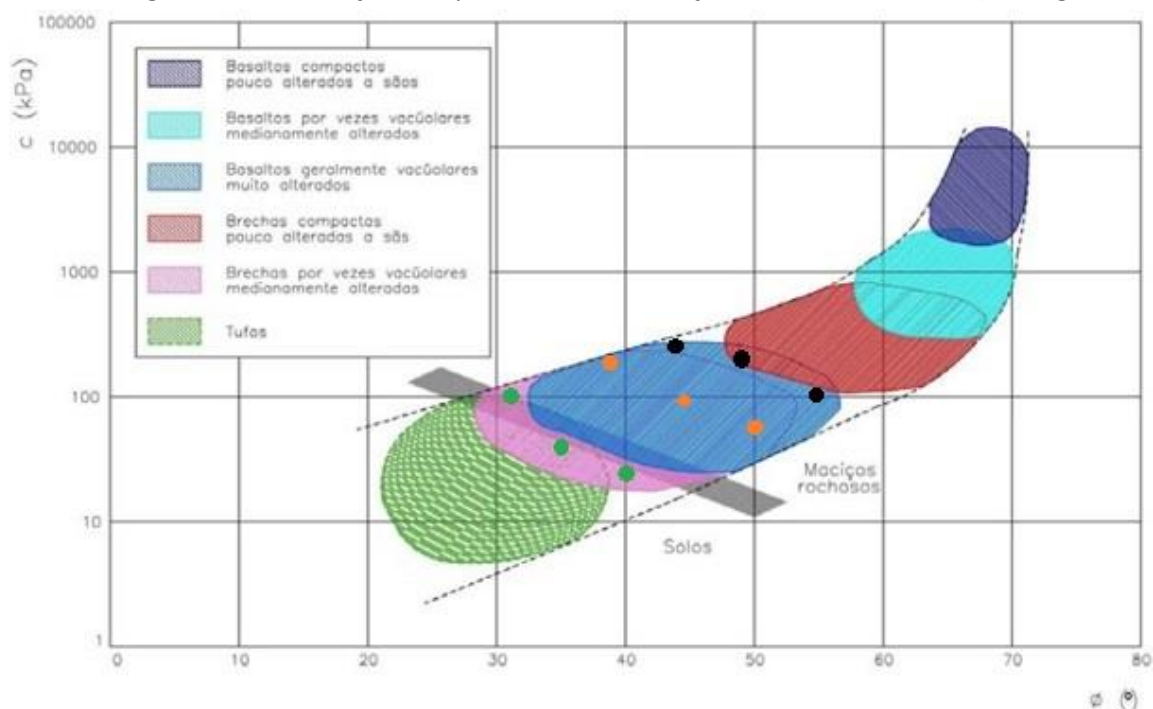


Figura 31 - Envolvente dos parâmetros de resistência ϕ e c para o complexo vulcânico B_2 (Pontos a verde – maciço composto por brechas medianamente alteradas; Pontos a laranja – maciço intermédio; Pontos a preto – maciço composto por basaltos muito alterados) (Adaptado de Cenorgeo, 2010)

Tabela 34 - Parâmetros resistentes do maciço rochoso

Análise		γ_t (KN/m ³)	ϕ (º)	c (KPa)
CASO 1 Maciço composto por brechas medianamente alteradas	Análise 1.1	22	31	100
	Análise 1.2	22	35	39
	Análise 1.3	22	40	25
CASO 2 Maciço intermedio	Análise 2.1	22	38	150
	Análise 2.2	22	44	90
	Análise 2.3	22	50	60
CASO 3 Maciço composto por basaltos muito alterados	Análise 3.1	22	43	225
	Análise 3.2	22	49	175
	Análise 3.3	22	55	100

5.1.2.1 Análise de estabilidade do talude A

Para a análise da estabilidade do talude A utilizou-se o *software* SLIDE 6.0, começou-se por definir os materiais rochosos, que compõem a análise (Tabela 34), bem como a modelação da geometria do talude, conforme pode-se verificar essa representação na Figura 32. Tendo em conta a análise da estabilidade, recorreu-se a três cortes geológicos (corte 1-1, corte 2-2 e corte 3-3), modelou-se cada um desses cortes em SLIDE 6.0, tendo em conta as simplificações anteriormente descritas, cuja geometria está ilustrada na Figura 32.

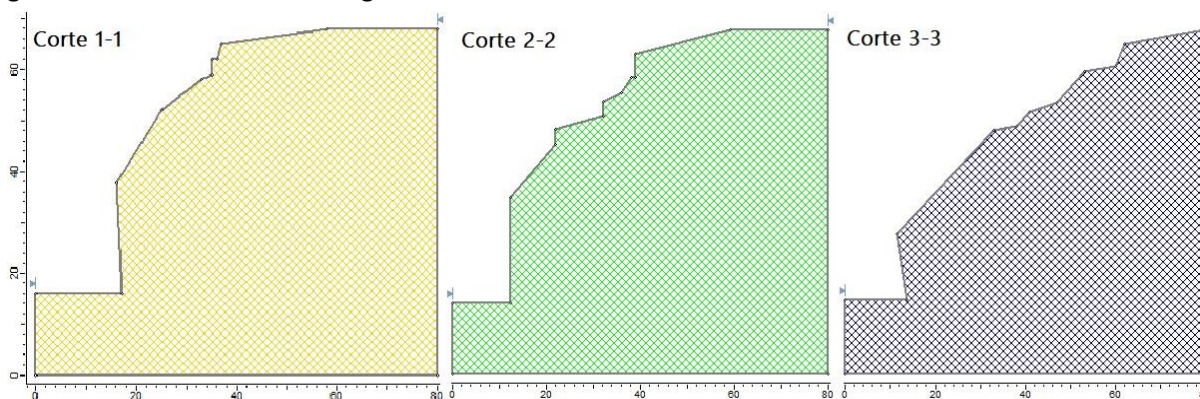


Figura 32 - Ilustração dos cortes em Slide 6.0

Este *software* de análise permite ao utilizador impor um tipo de rotura (circular ou não circular), neste caso em análise será superfície não circular (Figura 33) por ser esta que apresenta um fator de segurança mais condicionante.

Adotando como planar a superfície de rotura e segundo o qual procurou-se o valor do menor fator de segurança para os métodos escolhidos (Método de Janbu Simplificado, Método de Morgenstern & Price e Método de Spencer), tendo presente que estes métodos são os que melhor se adequam a este tipo de talude e de rotura. O cálculo do FS para o corte 1-1, **Caso 2**, análise 2.1 através do SLIDE 6.0 está representado na Figura 33. Foi determinado com a utilização do cálculo automático sendo um

exemplo das diversas interações efetuadas para os restantes casos. Esta análise através do SLIDE 6.0 permite definir automaticamente a superfície de deslizamento crítica.

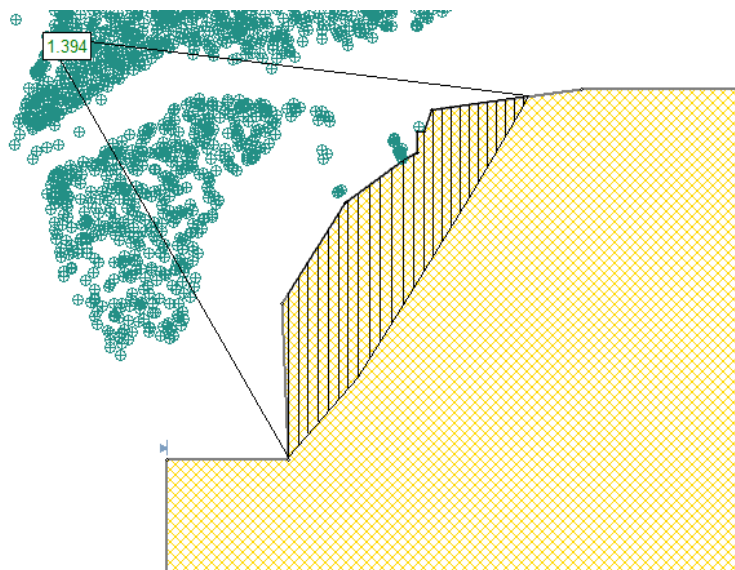


Figura 33 - Exemplo do SLIDE 6.0 com representação das fatias, superfície de rotura e fator de segurança

Vão ser analisados três casos, em cada caso será realizado três análises, tendo por base a parametrização dos parâmetros de resistência, nas quais vão se variar o ângulo de atrito e a coesão, mantendo-se constante o peso volúmico. A análise paramétrica consistiu em variar cada parâmetro resistente e proceder à determinação do FS. Através deste estudo pretende-se estudar o comportamento do talude, tendo em contas os diversos materiais presentes no maciço.

A determinação dos FS, para os diferentes métodos já mencionados anteriormente, obtido através das análises automáticas, são expostos nas tabelas seguintes, particularmente na Tabela 35 para o corte 1-1, na Tabela 36 para o corte 2-2 e na Tabela 37 para o corte 3-3, para os respetivos ângulos de atrito e coesão atrás descritos (Tabela 34). No **Anexo D** apresentam-se alguns exemplos do cálculo do FS pelo SLIDE 6.0, com a indicação da superfície crítica de deslizamento e dos fatores de segurança para cada método.

Tabela 35 - Resultados do F.S. para o Corte 1-1

Corte 1 – 1					
		Janbu Simplificado	Morgenstern & Price	Spencer	Média
Caso 1	Análise 1.1	0,985	1,014	0,977	0,992
	Análise 1.2	0,661	0,705	0,680	0,682
	Análise 1.3	0,571	0,583	0,566	0,573
Caso 2	Análise 2.1	1,394	1,565	1,466	1,475
	Análise 2.2	1,184	1,208	1,181	1,191
	Análise 2.3	1,063	1,071	1,101	1,078
Caso 3	Análise 3.1	1,924	1,966	2,188	2,026
	Análise 3.2	1,794	1,892	1,890	1,859
	Análise 3.3	1,536	1,571	1,569	1,559

Tendo em conta a Tabela 35, pode-se notar que os resultados alcançados, para os FS, são bastante próximos para os diversos métodos. Também pode-se verificar que nos **Casos 2 e 3** o método mais

condicionante é o método de Janbu Simplificado, por este apresentar um FS inferior aos restantes métodos. Outra das conclusões a retirar é que com a diminuição da coesão, o FS também diminui, sendo esta uma conclusão óbvia e já esperada.

No **Caso 1** da Tabela 35, verifica-se que a média dos FS para as três análises é inferior a 1. Tendo por base a descrição anteriormente feita, pode-se concluir que o **Caso 1** não será o mais representativo do talude em estudo, isto deve-se ao seu FS ser inferior a 1, que significaria um talude instável ou já teria atingido a rotura, caso que não se verifica no local. Tendo por base o **Caso 2 e 3**, por serem mais representativos do maciço em estudo, verifica-se que o menor FS toma o valor de 1,063 e o maior o valor de 2,188, tem-se aqui uma grande variação do FS ao longo dos diversos materiais geológicos.

Tabela 36 - Resultados do F.S. para o Corte 2-2

Corte 2 – 2					
		Janbu Simplificado	Morgenstern & Price	Spencer	Média
Caso 1	Análise 1.1	1,098	1,131	1,132	1,120
	Análise 1.2	0,701	0,705	0,705	0,704
	Análise 1.3	0,611	0,633	0,615	0,620
Caso 2	Análise 2.1	1,538	1,579	1,593	1,570
	Análise 2.2	1,273	1,302	1,316	1,297
	Análise 2.3	1,130	1,142	1,142	1,138
Caso 3	Análise 3.1	2,066	2,091	2,291	2,149
	Análise 3.2	2,004	1,961	2,130	2,032
	Análise 3.3	1,600	1,628	1,650	1,626

Através da observação da Tabela 36 pode-se verificar que os FS são superiores, quando comparados com o corte 1-1, conclui-se assim que este corte é menos condicionante que o corte anterior, isto deve-se à sua geometria. Tendo presente os resultados da Tabela 36, observa-se que os **Casos 1 e 2** apresentam como método mais condicionante o método de Janbu Simplificado.

Pode-se verificar que o **Caso 1**, análise 1.2 e 1.3, é pouco relevante neste talude, por apresentar um FS inferior, ou muito próximo de 1. Também se observa que no **Caso 3**, os fatores de segurança são muito elevados, próximos de 2, isto deve-se ao tipo de maciço admitido, logo os parâmetros de resistência também foram elevados.

Tabela 37 - Resultados do F.S. para o Corte 3-3

Corte 3 – 3					
		Janbu Simplificado	Morgenstern & Price	Spencer	Média
Caso 1	Análise 1.1	1,266	1,302	1,302	1,290
	Análise 1.2	0,833	0,827	0,830	0,830
	Análise 1.3	0,726	0,744	0,735	0,735
Caso 2	Análise 2.1	1,791	1,814	1,866	1,824
	Análise 2.2	1,470	1,510	1,532	1,504
	Análise 2.3	1,362	1,350	1,350	1,354
Caso 3	Análise 3.1	2,426	2,561	2,572	2,520
	Análise 3.2	2,305	2,396	2,402	2,368
	Análise 3.3	1,880	1,857	1,895	1,877

Assim, como nas anteriores duas tabelas (Tabela 35 e Tabela 36), verifica-se que os valores apresentados na Tabela 37 são muito próximos entre os diversos métodos. A partir da análise desta tabela, pode-se concluir que os FS para este corte são superiores aos anteriores dois cortes (corte 1–1 e corte 2–2), isto advém da geometria do corte, com menor inclinação.

Pode-se concluir que estes métodos variam em função do tipo de análise utilizada para a determinação do FS, se por equilíbrio de momentos ou por equilíbrio de forças, por isso obtém-se diferentes FS, variando ligeiramente entre os vários métodos. Como pode-se observar, todas as hipóteses calculadas pelo *software* SLIDE 6.0 tem uma estimativa do FS muito próximo.

Tendo em conta os resultados obtidos pelas análises anteriores, pode-se concluir que o **Caso 2 e 3** são os que melhor representam o maciço rochoso. Tendo em conta esta análise, pode-se afirmar que o corte 3–3 é o menos condicionante, já o corte mais condicionante é o corte 1–1, por apresentar valores do FS inferiores aos restantes cortes, por esta razão, o corte 1–1 deve ser alvo de uma análise detalhada, com o intuito de compreender a influência dos parâmetros resistentes na estabilidade.

Tendo por base o reconhecimento superficial efetuado na área em estudo, em especial na face do talude, definiram-se, conservativamente, os parâmetros necessários à aplicação do critério de rotura de Hoek-Brown, através das classificações RMR e GSI (ver 4.7.1.2). Com base no exposto, e considerando as análises anteriormente realizadas para a obtenção do FS do talude A, recorre-se a uma nova análise paramétrica, mais refinada, com o intuito de compreender a influência dos parâmetros resistentes na determinação do FS.

Análise de sensibilidade do parâmetro coesão:

Para melhor compreender o efeito dos parâmetros resistentes na variação do FS, vai-se considerar, numa primeira análise, a fixação do peso volúmico e do ângulo de atrito, fazendo variar a coesão. O valor admitido para o ângulo de atrito do maciço foi de 39 °, tendo este valor sido determinado através das classificações geomecânicas do talude (ver 4.7.1.2), já o peso volúmico terá o valor de 22 KN/m³.

Nesta primeira parametrização fez-se variar da coesão entre 175 KPa e 210 KPa, com incrementos de 7 KPa entre cada análise, mantendo-se constante os restantes parâmetros resistentes do maciço, como demonstra a Tabela 38. O intervalo de valores de coesão, admitidos nesta análise, foram escolhidos por melhor representarem o talude em análise, sendo esta nova análise um refinamento das análises anteriormente executadas, com esta análise pretende-se compreender a influência da coesão na determinação do FS. Na Tabela 38 apresenta-se os valores admitidos para os parâmetros resistentes do maciço, no cálculo do fator de segurança do talude A.

Tabela 38 - Parâmetros resistentes do maciço utilizado na primeira parametrização

	Peso volúmico (γ_t)	Ângulo de atrito (ϕ')	Coesão (C')
Parametrização 1.1	22 KN/m ³	39 °	175 KPa
Parametrização 1.2	22 KN/m ³	39 °	182 KPa
Parametrização 1.3	22 KN/m ³	39 °	189 KPa
Parametrização 1.4	22 KN/m ³	39 °	196 KPa
Parametrização 1.5	22 KN/m ³	39 °	203 KPa
Parametrização 1.6	22 KN/m ³	39 °	210 KPa

Com estas seis análises pretende-se salientar a importância do parâmetro coesão na determinação do FS do talude A, para isso aplicou-se o *software* SLIDE 6.0 no corte mais condicionante, (corte 1–1 é o corte mais desfavorável na análise de estabilidade). Na Tabela 39 apresenta-se os valores do FS para o talude A, tendo sempre presente os métodos que melhor representam este talude, bem como os diferentes valores de resistência admitidos para esta análise, presentes na Tabela 38.

Tabela 39 - Valores do fator de segurança para a primeira parametrização

Corte 1 – 1					
	Janbu Simplificado	Morgenstern & Price	Spencer	Média	%
Parametrização 1.1	1,555	1,608	1,634	1,599	+2,28
Parametrização 1.2	1,595	1,640	1,674	1,636	+2,31
Parametrização 1.3	1,634	1,676	1,715	1,675	+2,24
Parametrização 1.4	1,674	1,709	1,757	1,713	+2,23
Parametrização 1.5	1,714	1,745	1,798	1,752	+2,10
Parametrização 1.6	1,753	1,777	1,840	1,790	

Perante os resultados apresentados na Tabela 39, pode-se observar que os FS são algo elevados, não estando em causa a instabilidade do talude, também pode-se verificar que um aumento da coesão do maciço implica também um aumento do FS. Tendo por base a anterior análise verifica-se que o método mais condicionante é o método de Janbu Simplificado.

Através de uma observação minuciosa da Tabela 39 pode-se verificar que a percentagem de aumento, de cada análise, situa-se um pouco acima de 2%. Na **parametrização 1.1** verifica-se que a média dos fatores de segurança para os três métodos dá um valor de 1,599, já na **parametrização 1.2** obtém-se um valor de 1,636, comparando estes dois valores verifica-se que ocorre um acréscimo na **parametrização 1.2** de 2,28% em relação a **parametrização 1.1**.

Na Figura 34 apresenta-se o gráfico com a variação do FS em função da coesão. Tendo por base esse gráfico, pode-se facilmente perceber que ocorre uma correlação linear direta o FS e a coesão, observa-se uma linha de tendência linear na combinação dos pontos obtidos. Deste modo compreende-se a grande influência que o parâmetro coesão tem na determinação do FS.

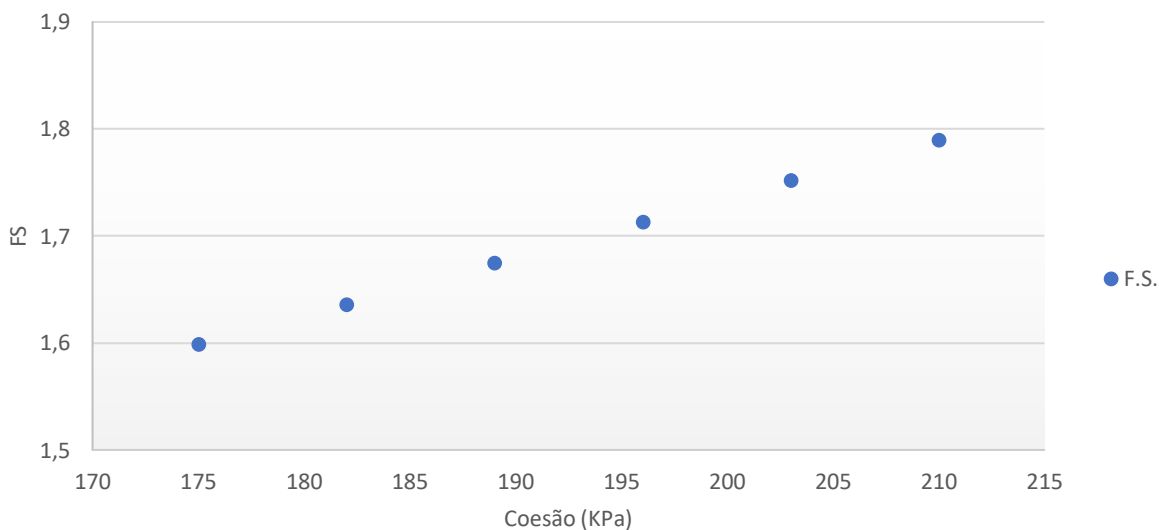


Figura 34 - Variação do fator de segurança em função da coesão

Análise de sensibilidade do parâmetro ângulo de atrito:

Para compreender o efeito do ângulo de atrito na variação do FS, vai-se considerar nesta segunda análise a variação do ângulo de atrito, mantendo-se o valor dos parâmetros coesão e peso volúmico. O valor escolhido para coesão do maciço foi de 196 KPa, este valor foi calculado através das classificações geomecânicas aplicadas ao talude A, já o peso volúmico continua a ser o mesmo (22 KN/m³). Nesta segunda parametrização fez-se a variação do ângulo de atrito através do incremento de 4º entre cada análise, tendo-se iniciado com 35º. Este intervalo para os valores de ângulos de atrito foram escolhidos por melhor representarem o talude A, tendo sido escolhido como um refinamento da primeira análise. Nesta segunda parametrização adotou-se os seguintes valores para os parâmetros resistentes do maciço, estes valores podem ser consultados na Tabela 40.

Tabela 40 - Parâmetros resistentes do maciço utilizado na segunda parametrização

	Peso volúmico (γ_t)	Coesão (C')	Ângulo de atrito (ϕ')
Parametrização 2.1	22 KN/m ³	196 KPa	35º
Parametrização 2.2	22 KN/m ³	196 KPa	39º
Parametrização 2.3	22 KN/m ³	196 KPa	43º
Parametrização 2.4	22 KN/m ³	196 KPa	47º
Parametrização 2.5	22 KN/m ³	196 KPa	51º
Parametrização 2.6	22 KN/m ³	196 KPa	55º

A análise da variação do FS em função do ângulo de atrito foi determinada para o corte 1–1, por ser este o corte mais desfavorável. Na Tabela 41 apresenta-se os diversos valores do FS para o talude A, tendo em conta a variação do ângulo de atrito.

Tabela 41 - Valores do fator de segurança para a segunda parametrização

	Corte 1 – 1				%
	Janbu Simplificado	Morgenstern & Price	Spencer	Média	
Parametrização 2.1	1,598	1,607	1,847	1,684	+1,71
Parametrização 2.2	1,674	1,709	1,757	1,713	+5,39
Parametrização 2.3	1,760	1,825	1,848	1,811	+5,79
Parametrização 2.4	1,858	1,955	1,954	1,922	+6,33
Parametrização 2.5	1,972	2,109	2,076	2,052	+2,16
Parametrização 2.6	2,107	2,094	2,092	2,098	

Os FS desta segunda parametrização são elevados não estando em causa a estabilidade do talude A. Assim como na Tabela 39, verifica-se que o aumento do ângulo de atrito implica um aumento do FS. Através da análise da Tabela 41, pode-se confirmar que o método mais condicionante é o método de Janbu Simplificado, outra das conclusões é que à percentagem de aumento, entre cada análise, é variada, ao contrário da primeira parametrização que situava-se perto de 2%. Na Figura 35 pode-se confirmar que ocorre uma correlação linear entre FS e o ângulo de atrito.

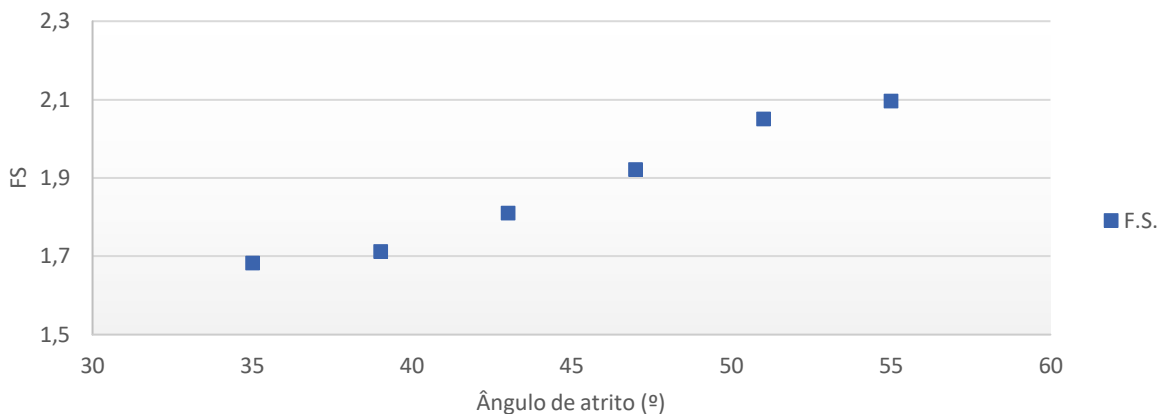


Figura 35 - Variação do fator de segurança em função do ângulo de atrito

Observações aos resultados:

Perante os resultados alcançados erguem-se determinadas questões que importa clarificar: se os cortes geológicos analisados foram os mais adequados e se são os mais representativos da realidade; se os indicadores físicos admitidos para o estrato foram os mais corretos ou representativos da realidade.

A representação dos taludes reais nos *software* de análise de estabilidade implicam uma certa simplificação da realidade, isto deve-se à representação ser efetuada em duas dimensões, por isso escolhe-se os cortes mais condicionantes. Na escolha do estrato não há uma certeza absoluta em relação aos parâmetros dos materiais interiores do maciço.

Pode-se definir os *software* de análise como uma ferramenta acessória em conformidade com a qual não se deve interrogar sobre os resultados mas sim sobre a sua representatividade dos mesmos, nas questões reais de engenharia. Como já foi referido anteriormente os maciços da ilha da Madeira são muito heterogêneos, o caso de análise não é exceção. Devido a estes e outro fatores foi conveniente executar uma análise paramétrica para compreender e avaliar, por um lado, procurar chegar aos parâmetros de resistência, e por outro, quais os parâmetros mais condicionantes da estabilidade.

Tendo por base a análise paramétrica efetuada anteriormente, pode-se verificar que o ângulo de atrito e a coesão do maciço são parâmetros com grande influência no fator de segurança do talude, apresentando-se diretamente proporcional. No que respeita ao peso volúmico, este não foi tido em conta na análise paramétrica (aplicou-se sempre o mesmo peso volúmico), porque admite-se que o peso volúmico tem menor incerteza associada.

5.1.3 Análise de estabilidade do talude A, após a intervenção

O talude em análise foi alvo de uma intervenção. Neste sentido, vai-se calcular o fator de segurança para o talude A após a escavação. No dimensionamento de taludes pregados e dada a complexidade e

importância da obra, aliada à altura do talude em análise recorreu-se ao *software* SLIDE 6.0 para verificar a estabilidade global após a execução de toda a escavação, procurando superfícies de rotura profundas que se desenvolvam para o interior do maciço, recorrendo-se à solução de contenção que será descrita na *secção* 5.9, de betão projetado e pregagens.

Assim, recorreu-se a valores considerados típicos deste tipo de maciços e considerando as análises paramétricas anteriormente realizada, vai-se admitir, conservativamente, os valores para os parâmetros de resistência do maciço (coesão e ângulo de atrito), tendo em conta as classificações geomecânicas (*ver* 4.7.1.2), o valor de:

- ❖ Peso volúmico (γ_t) = 22 KN/m³;
- ❖ Coesão (ϕ') = 196 KPa;
- ❖ Ângulo de atrito (C') = 39 °.

Apesar dos elevados valores de resistência assim obtidos, esta metodologia não deixa de ser bastante conservativa, tendo-se desprezado diversos fatores que contribuiriam para uma maior resistência, nomeadamente, um previsível menor grau de fracturação e estado de alteração do maciço para o interior do talude e um estado de tensão mais elevado associado às superfícies de rotura que atravessam o interior do mesmo.

Para a verificação de segurança da estabilidade global, foi considerada a seguinte situação de cálculo: verificação da estabilidade global do talude de escavação, após a execução de toda a escavação, procurando superfícies de rotura profundas que se desenvolvam para o interior do maciço, recorrendo à solução de betão projetado e pregagens.

A análise da estabilidade global foi feita para os mesmos cortes anteriormente referidos (Corte 1-1, 2-2 e 3-3), e para a situação de cálculo anteriormente referida. No **Anexo E** apresentam-se os perfis de cálculo considerados, com a indicação da superfície crítica de deslizamento e o conjunto de coeficientes de segurança global. Na Tabela 42 apresenta-se o resumo dos coeficientes globais de segurança obtidos.

Tabela 42 - Coeficientes globais de segurança para a situação de cálculo

Corte	Situação de cálculo			
	Janbu Simplificado	Morgenstern & Price	Spencer	Média
Corte 1 – 1	1,784	1,926	1,928	1,879
Corte 2 – 2	1,776	1,821	1,804	1,800
Corte 3 – 3	2,033	2,073	2,098	2,068

Da análise da tabela apresentada, conclui-se que a intervenção realizada no talude contribui para o incremento no fator de segurança do talude.

5.2 Descrição geral das soluções aplicadas em obra

5.2.1 Considerações gerais

No talude A, formado por um talude praticamente na vertical, sobre o qual se desenvolve um outro talude mais suave, mas ainda assim, sem acessos para as máquinas e materiais que permitisse a execução dos trabalhos. Assim, executou-se o desmonte por bancadas associado, sempre que necessário, à realização de um revestimento de betão projetado pregado. Tratou-se de uma solução tecnicamente mais viável para a estabilização deste talude e com custos de manutenção menores, que assegurará, as condições de segurança necessárias para a circulação de veículos e pessoas na plataforma rodoviária.

No talude B, dado que os registos de ocorrências de queda de material está quase exclusivamente associados à superfície do talude contíguo à estrada, a solução mais adequada foi o tratamento sistemático deste talude. Para além deste tratamento, foi ainda pertinente evitar, sempre que possível, a queda de materiais e de blocos do talude situado acima desta zona, pelo que, para esta zona, foi tido em conta algumas medidas para atenuar essas eventuais quedas de materiais, através da colocação de barreiras dinâmicas.

Seguidamente apresenta-se a conceção dos diferentes tipos de soluções utilizadas para os dois taludes em estudo, efetuando-se a respetiva descrição geral.

5.2.2 Talude A

5.2.2.1 Solução de desmonte

A solução de estabilização adotada, de desmonte por bancadas do maciço, irá conduzir ao reperfilamento do talude A. Esta é uma das soluções mais indicada para resolver a situação existente de zonas com inclinações negativas, a qual será complementada, pela proteção do terreno que se encontra por detrás da superfície do talude que será escavado.

O desmonte por bancadas do maciço foi efetuado de cima para baixo, a partir de um acesso criado para o efeito, em bancadas horizontais com altura máxima de 2 a 3 m, criando plataformas de trabalho longitudinais com a largura necessária para a circulação de trabalhadores e equipamentos, mas tendo sempre em conta, uma zona de proteção de cerca de 1 a 2 m no bordo exterior do talude.

A escavação foi feita com muitos cuidados procurando evitar a queda descontrolada de blocos e de massas de terreno uma vez que quaisquer materiais que caiam desta zona, de forma não controlada, no caso de transporem a barreira de proteção colocada no local, poderiam provocar danos muito significativos na moradia, localizada abaixo da cota da estrada.

Esta barreira de proteção foi constituída por várias fiadas de painéis metálicos, apoiados em postes cravados no pavimento, desenvolve-se ao longo da estrada, na berma contrária do talude, permitiu que a estrada funcionasse como bacia de retenção de blocos e de material proveniente do desmonte do talude. Na zona da moradia, onde é necessário garantir uma barreira de proteção mais eficaz, preconizou-se a colocação de painéis metálicos, junto a habitação (Figura 36).



Figura 36 - Proteção colocada na berma da estrada e na habitação

Relativamente à evacuação dos materiais escavados no talude, estes foram encaminhados para a base, predominantemente para a zona Norte do talude, para o vale da ribeira de S. João. A retirada das terras de escavação do topo do talude foi feita diretamente para o vale da ribeira, esta solução permitiu manter o acesso à habitação, localizadas na base do talude, ao abrigo de quaisquer danos.

A solução executada no talude de escavação na zona de maciço a desmontar teve uma inclinação de 5V:1H nos três panos superiores e 3V:1H no pano inferior, localizado junto à estrada, com banquetas entre panos, com alturas variáveis entre 10 e 15 m e uma largura mínima de 2,0 m (Figura 37).



Figura 37 - Desmonte do Talude

As banquetas executadas têm ligação às plataformas que já existam na extremidade do talude a consolidar. O pano inferior do talude, que tem uma inclinação mais suave, foi assim definido por forma a garantir uma escavação mínima para o interior do maciço.

Após a escavação do maciço, foi aplicado um revestimento sistemático em betão projetado e pregado em toda a altura do talude a consolidar. Esta solução de revestimento pregado, para além de permitir um efeito de pele suficiente para confinar e evitar a progressiva desagregação do maciço, garante também as condições de estabilidade segundo potenciais cunhas subverticais e constitui um revestimento ligeiro, flexível e económico.

A solução pressupões que a escavação fosse efetuada por fases sucessivas, de cima para baixo, com colocação imediata dos elementos de sustimento. Este processo foi executado com o objetivo de perturbar o mínimo possível o terreno natural durante a execução, de modo a tirar o máximo partido das suas características mecânicas. O revestimento com betão projetado (Figura 38) é constituído por duas camadas de betão projetado, com 0,05 m de espessura cada (espessura total de 0,10 m), incorporando uma rede electrossoldada constituída por varões longitudinais e transversais de aço A500ER de diâmetro ϕ 5mm, dispostos numa malha quadrada de 100mmx100mm. Na camada final de betão projetado foi incorporado um aditivo colorante.



Figura 38 - Primeira camada de betão projetado, com espessura de 0,05 m

As pregagens são constituídas por varões de aço A500 NR com 32 mm de diâmetro, seladas com calda de cimento em furos com diâmetro de 3" (0,076 m), inclinados a 15° com a horizontal e executadas com martelos de rotoperussão.

As pregagens foram executadas com um afastamento que varia de 1,5 m x 1,5 m a 2 m x 2,25 m, em quincôncio, resultando, desta forma, uma área de influência entre 2,25 a 4,5 m² por pregagem. Na definição da malha de pregagens ao longo de todo o talude, adotou-se que, dada a previsibilidade da natureza mais alterada e desagregada do maciço na zona superior, a malha de pregagens fosse mais

apertada nos panos superiores, procedendo, progressivamente, à sua redução à medida que avançou os trabalhos de escavação para os taludes inferiores.



Figura 39 - Malha e pregagens em quincôncio

Tratando-se de taludes de grande altura, efetuou-se pregagens mais compridas na parte superior, por forma a reduzir os deslocamentos nessa zona e garantir condições mais eficazes de reforço do terreno. As pregagens tem comprimentos variáveis de 12 m, na zona superior, até 6 m, na zona inferior.

Para um adequado comportamento deste método de contenção do terreno foi fundamental e imperativo que o sustimento fosse colocado em obra à medida que prosseguia a escavação. A superfície de escavação foi o mais regular possível sem sobreescavações, ângulos vivos ou formas convexas. Em qualquer situação, o revestimento foi colocado tão rapidamente quanto possível após a escavação, para tornar máxima a sua eficácia.

As escavações foram realizadas por fases sucessivas de forma a limitar, no espaço e no tempo, os efeitos da descompressão devidos ao alívio do maciço, para que não haja uma redução sensível das características mecânicas iniciais do terreno e colocar o mais rapidamente possível após a escavação, o revestimento de pele contínuo que introduz um ligeiro confinamento, neutralizando a redução de tensões e os deslocamentos iniciais da superfície escavada melhorando deste modo as características mecânicas do terreno.

A colocação das pregagens tornou o maciço autoestável à medida que se foi processando as escavações. Refere-se que as pregagens são elementos passivos no início, mas que se tornam rapidamente ativos, em face dos deslocamentos induzidos à medida que prossegue a escavação.

Devido à instalação de inúmeras pregagens o sistema de reforço global apresenta uma elevada redundância. O sistema pode ser caracterizado por uma flexibilidade própria muito boa no desempenho sísmico, apresentando uma boa adaptação às várias condições geológicas do terreno.

De seguida (Figura 40) exemplifica-se todas as etapas necessárias para a estabilização de um talude rochoso. Este processo foi implementado para a execução da estabilização do talude A.



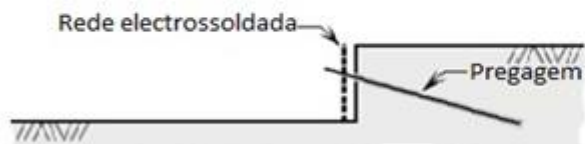
① Escavação até à profundidade adequada



② Aplicação da primeira camada de betão projetado



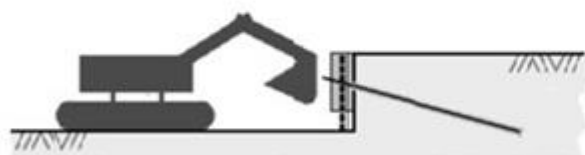
③ Perfuração para introdução das pregagens



④ Instalação da rede electrossoldada e introdução das pregagens



⑤ Aplicação da segunda camada de betão projetado



⑥ Escavação do nível seguinte



Figura 40 - Sequência da estabilização de um talude de escavação (Adaptado de Santos, 2014)

5.2.2.2 Muro de suporte no topo do talude

Numa zona particular no topo do talude, em que a morfologia existente não permitiu manter o alinhamento dos taludes de escavação, foi necessário recorrer a uma solução de muro de suporte (Figura 41) em aterro. Sendo que este novo muro permitiu a execução em segurança do talude de escavação preconizado na sua base.

O muro de suporte (Figura 41) tem cerca de 40,0 m de desenvolvimento e uma altura total variável entre 6,0 e 6,5 m. É do tipo semi-gravidade, constituído por uma parte inferior amaciçada em betão ciclópico, betonada contra o terreno e definida na maior altura possível de forma a minimizar os volumes de escavação e a garantir um bom encastramento da base, e uma parte superior, correspondente à altura de aterro, é constituída por uma consola em betão armado. Por questões de integração paisagística executou-se um revestimento em pedra arrumada à mão na frente do muro, com espessura de 0,30 m.



Figura 41 - Muro de suporte no topo do talude

Por estar implantado no topo do talude com grande altura, e com plataforma de certa forma limitada, a sua execução foi feita de forma faseada e cuidada, por troços longitudinais com comprimento máximo de cerca de 10,0 m, permitindo, também, desta forma, controlar o bom comportamento do maciço na fase de escavação. O arraste de finos, eventualmente provocado pela percolação de água, foi tido em conta através da colocação de uma tira de dreno geocompósito drenante. O aterro no tardo de este muro foi executado com solos granulares grosseiros, provenientes da escavação. Estes materiais de aterro foram compactados por camadas com espessura máxima de 0,30 m.

5.2.2.3 Drenagem

De forma a proteger eficazmente o revestimento de betão projetado contra as águas de percolação, que podem promover impulsos significativos e uma degradação rápida de resistência das armaduras e do betão projetado, executou-se um sistema de drenagem subsuperficial constituído por bueiros em tubos de PVC $\phi 75$ mm associados a tiras de dreno geocompósito drenante com 0,20 m de largura, onde fosse provável que possam vir a ocorrer afluições de água ao talude.

O afastamento horizontal dos bueiros foi o dobro do definido para as pregagens, sendo o afastamento vertical igual ao das pregagens. Nos casos em que não exista pregagens o afastamento dos bueiros foi de 3 m x 3 m (Figura 42). A malha de bueiros foi sempre disposta em quincôncio. Este sistema foi reforçado nas zonas em que, durante o avanço das escavações, se verificou um maior aparecimento de água.



Figura 42 - Malha de bueiros

Para a recolha das águas superficiais afluentes ao topo do talude e às diversas banquetas, e sua condução para o extremo Norte do talude, foi colocadas valetas em meias manilhas $\phi 300$ mm (Figura 43), que vão descarregar em caixas de reunião ligadas a tubos de queda que permitem o encaminhamento da água para a ribeira existente no lado NW, ao nível da cota da base do talude.



Figura 43 - Valeta de meia manilha e caixa de reunião

No tardo do muro no topo do talude foi executado um dreno de brita longitudinal envolvido em geotêxtil que descarrega para o exterior através de bueiros $\phi 75$ mm afastados de 3,0 m, e ainda de um sistema constituído por tiras de dreno geocompósito no tardo do batólito de betão ciclópico, que descarrega para o exterior através de bueiros $\phi 75$ mm afastados de 6,0 m e um conjunto de geodrenos longitudinais na base do muro com diâmetro $\phi 65$ mm.

5.2.2.4 Observações

Nesta obra foi implantado um conjunto de marcas topográficas na zona superior do talude, para controlo dos deslocamentos. Foram instaladas no total 15 marcas no topo do talude escarpa para permitir a observação dos deslocamentos segundo os três eixos coordenados. Para além das marcas, executou-se duas calhas inclinométricas com 45 m de altura cada, seladas num furo de sondagem para observação dos deslocamentos horizontais do maciço em profundidade.

A frequência das leituras foram executadas semanalmente e logo após a execução de cada fase de escavação. Depois de concluída a execução das estruturas de suporte e contenção as leituras foram efetuadas de 15 em 15 dias até à conclusão da obra. Após a conclusão da obra e por um prazo mínimo de 6 meses, que deverá englobar o período de Inverno, prevê-se leituras mensalmente.

No **Anexo F** são apresentados as fotos tiradas ao longo da estabilização do talude A assim como o resultado final da estabilização do talude A.

5.2.3 Talude B

Conforme já foi referido, o talude B, desenvolveu a WNW da ribeira de S. João, dado que os registos de ocorrências de queda de materiais parecem estar quase sempre associados a pequenos

desprendimentos da superfície do talude contíguo à estrada, a solução preconizada para este talude foi a de um tratamento com recurso a betão projetado e pregagens pontuais, associado à colocação de barreiras dinâmicas no topo do talude.

Tendo em vista a necessidade de proceder à proteção e estabilização dos níveis de tufos e de brechas situados no talude subvertical contíguo à estrada regional, foi aplicado um revestimento em betão projetado com duas camadas com espessura mínima total de 0,10 m, com a última camada com aditivo colorante de cor idêntica à das formações envolventes. Associado a este revestimento foi ainda executadas pregagens de reforço com diâmetro $\phi 32$ mm em aço A500 NR, com comprimentos variáveis entre 4 e 6 m, numa malha em quincôncio (aproximadamente 2V:2H). Ao longo desta zona, sempre que necessário, foram incluídos bueiros em tubos de PVC com diâmetro $\phi 75$ mm associados a tiras de geocompósito drenante.

Refere-se, ainda, que no topo do talude vertical, imediatamente abaixo do local onde se definiu a colocação da barreira dinâmica, efetuou-se uma limpeza prévia da vegetação, das terras e dos fragmentos de rocha soltos que aí se encontravam depositados.

Implementou-se também a instalação no topo deste talude de uma barreira dinâmica de alta energia com 3 m de altura com energia de retenção até 1000kJ (Figura 44). O recurso a barreiras dinâmicas no topo do talude deve-se ao facto de ter sido detetado a existência de alguns blocos soltos ao longo desta zona, provenientes do talude superior. Com esta medida admite-se vir a assegurar no futuro que a estrada não venha a ser afetada por novos desprendimentos.



Figura 44 - Barreira dinâmica no Talude B

O processo de tratamento e estabilização do talude B pode ser consultado no **Anexo G**, onde se encontra as fotos do processo de intervenção neste talude.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho pretendeu salientar a importância de uma boa caracterização geotécnica, geológica e geomecânica no estudo da compartimentação de taludes rochosos, assim como aplicar as classificações geomecânicas RMR e GSI. Para poder chegar a esse objetivo foi efetuado um levantamento sistemático das discontinuidades presentes na superfície exposta dos taludes. A avaliação compreendeu a análise da caracterização de dois taludes rochosos sobranceiros à ER 222, na Ponta do Sol, sobre os quais se efetuou um reconhecimento geotécnico na superfície exposta.

Foi um desafio estimulante compreender de que forma os parâmetros geotécnicos, geológicos-estruturais e geomecânico se interligam, de forma a compreender o desempenho geral de todo o processo de classificação de um maciço rochoso. Ao longo das investigações geotécnicas surgem obstáculos, não sendo este trabalho exceção, sendo a complexidade de se expressar a qualidade de um talude rochoso com um único índice devido à inconstância das estruturas presentes. Os taludes rochosos escolhidos para esta análise apresentam particularidades geomorfológicas que promovem situações de instabilidade e risco.

6.1 Conclusões do trabalho realizado

A caracterização geológica das unidades presentes na área de estudo foi realizada com recurso a observação das faces expostas dos taludes. Este trabalho teve como um dos primeiros objetivos a caracterização geomecânica e geotécnica de dois taludes rochosos, designados por talude A e talude B. Tendo por base o estudo geológico, geotécnico e geomecânico realizado, pode-se tecer algumas conclusões:

- ❖ Tendo por base o refinamento das unidades geológicas locais, pode-se afirmar que há predominância das formações basálticas sobre as brechas, embora as escoadas basálticas se apresentem geralmente muito fraturadas. Os níveis de brechas que ocorrem intercalados são geralmente menos espessos e apresentam contornos irregulares e formas lenticulares;
- ❖ A observação da face exposta dos taludes permitiu o reconhecimento de uma rede de discontinuidades, sendo estas descritas predominantemente por diáclases, apresentando duas direções principais, subverticais e sub-horizontais;
- ❖ O material rochoso analisado pode ser caracterizado por predominantemente fraturado, em termos de qualidade geotécnica apresenta um grau de fraturação medianamente afastada (F_3);
- ❖ Após a análise dos dados do grau de alteração pode-se constatar que o material rochoso aflorante no talude A pode ser classificado como basáltico moderadamente alterado (W_3), já o talude B pode ser definir como ligeiramente alterado (W_2).

Tendo por base a caracterização geomecânica dos taludes rochosos, pode-se referir que o talude B apresenta numerosas fraturas que variam desde poucos metros até alguns metros. Já o talude A tem fraturas que variam numa gama de pequenas dimensões, cuja extensão varia entre 1 metros e 3 metros.

Como características principais pode-se definir as características geométricas e geológicas que contribuem para a possibilidade de rotura. Tendo presente estas particularidades dos materiais estudados para os dois taludes rochosos, pode-se afirmar que compõe, possível causa de instabilidade do talude rochoso a orientação das descontinuidades, no caso do talude A.

Para uma melhor elaboração de um projeto, atualmente deve-se utilizar vários métodos em simultâneo, para uma melhor certeza e segurança face a incerteza que esta subjacente aos maciços rochosos. Tendo por base a aplicação das classificações geomecânicas, ao talude A e talude B, pode-se tecer algumas conclusões quanto aos resultados obtidos para os índices RMR e GSI:

- ❖ As descontinuidades apresentam uma fracturação muito intensa em ambos os taludes, deste modo ocorrem no talude A como medianamente rugosas (R_3) a muito rugosas (R_{1-2}), já o talude B, observa-se que a rugosidade dominante é pouco rugosa (R_{4-5}). A rugosidade das descontinuidades influencia sobretudo na resistência ao corte;
- ❖ No talude B, não se observou a existência de água na superfície das descontinuidades, contudo o talude A pode-se verificar a presença de uma zona húmida relacionada com a presença de água, não ocorrendo esta de forma generalizada;
- ❖ Tendo em conta os valores das classificações, pode-se afirmar que o talude B apresenta um índice de qualidade superior ao talude A. Os valores do talude A apresentam uma predominância do índice de qualidade razoável, já o talude B, pode-se concluir que se trata de um maciço de boa qualidade.

Ao longo deste trabalho verificou-se que as classificações sendo interpretativas e executadas com base em observações do maciço rochoso, elas fornecem e representam bem as características geológicas do maciço. Uma das desvantagens das classificações geomecânicas reside da não antecipação de problemas pontuais, tendo estes que ser observados no local e tratados em concordância com a necessidade pontual do problema. Neste caso de estudo verificou-se que o problema não era geral mais sim local (caso das consolas formadas nos basaltos).

A queda de blocos surge geralmente em taludes muito íngremes, como é o caso do talude analisado. Os blocos que se desprendem do talude, sem a presença de uma superfície de deslocamento, ocorrem pela ação da gravidade em resultado da ação das intempéries. Até à atualidade não há meios de quantificação do efeito da cobertura vegetal na estabilidade de taludes, mas pode-se afirmar que as raízes produzem uma fonte de instabilidade do talude através da introdução das raízes nas descontinuidades, presentes no maciço. A modificação da geometria do talude, para a implementação da ER 222, constitui um fator desestabilizador para o talude, isto deveu-se a alteração da inclinação do talude.

Ao longo da análise de estabilidade do talude, realizou-se uma simulação numérica de várias análises de estabilidade do talude A, com o intuito de compreender a influência dos parâmetros resistentes no cálculo do fator de segurança. No entanto, os parâmetros originaram fatores de segurança elevados, para o maciço intermedio (**Caso 2**) e para o maciço resistente (**Caso 3**). Esses resultados, remetem para a ideia de que, sob o contexto estudado os taludes estão sempre em equilíbrio. Só quando foram adotadas condições extremas (**Caso 1**), ou seja, quando os valores de coesão foram extremamente baixos, é que o fator de segurança se mostrou inferior a 1. No caso de estudo, verifica-se que a estabilidade do talude só estaria em causa, se admitisse um maciço composto, na sua totalidade, por brechas por vezes vacuolares medianamente alteradas (**Caso 1**), não sendo este o caso, mas representativo do maciço.

Após a análise do talude A verifica-se que os resultados alcançados pelos diversos métodos são muito próximos, o que aumenta a segurança sobre os mesmos. Na análise efetuada verificou-se que o fator de segurança se altera de forma proporcional com a coesão e ângulo de atrito. Já o peso volúmico foi admitido constante porque este não apresenta variação significativa.

Pode-se apontar algumas críticas aos resultados obtidos, as particularidades específicas da Ilha da Madeira, a complexidade estrutural das formações vulcânicas bem como a grande heterogeneidade, conduz a muitas dificuldades no reconhecimento e caracterização mecânica, daí não possibilitar a modelação na íntegra de todos os estratos e formações geológicas presentes no maciço.

6.2 Recomendações para desenvolvimentos futuros

Realizar uma caracterização completa e pormenorizada dos taludes rochosos é um procedimento moroso e trabalhoso, envolvendo muito trabalho de recolha e análise. De forma a compreender o comportamento dos taludes rochosos na região, para as diversas situações de adversidade, sugere-se para trabalhos futuros:

- ❖ Efetuar uma caracterização completa e detalhada dos maciços rochosos, com recurso a ensaios laboratoriais, de forma a confirmar os resultados obtidos no âmbito do presente estudo.
- ❖ Considera-se de grande interesse aprofundar o estudo da análise da estabilidade depois da intervenção realizada no local, assim como o estudo de um modelo hidrogeotécnico, de forma a dar suporte à análise de estabilidade, abordando o interesse da caracterização do nível freático e a sua influência no maciço;
- ❖ Tendo por base a análise efetuada, recomenda-se a realização de uma retro-análise para verificar os índices resistentes do maciço.
- ❖ Levantamento de taludes rochosos na região Autónoma da Madeira e realização de ensaios laboratoriais para a determinação dos índices físicos, procurando efetuar uma análise de estabilidade dos taludes com recurso a programas de cálculo automático, tendo como finalidade a elaboração de um mapa de risco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aires-Barros, L. (1991). *Alteração e alterabilidade de rochas*. Lisboa: Instituto Nacional de Investigação Científica.
- Alberto, J. (2010). Avaliação dos processos de instabilidade do talude da capelinha de Nossa Senhora do Monte. *Disertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra*.
- Andrade, P. G. (2004). Caracterização geomecânica e análise da estabilidade em maciços rochosos anisotrópicos : taludes do IP3 e da EN234 (Portugal Central). *Tese de doutoramento*. Univercidade de Coimbra.
- Bell, F. (2007). *Engineering Geology, Second edition*. Elsevier.
- Bieniawski, R. Z. (Madrid de 2011). Erro na Aplicação das Classificações Geomecânicas e Respectiva Correção. *Bieniawski Design Enterprises, USA*.
- Bieniawski, Z. T. (1970). Rock mass classification in rock engineering. 97-106. Johannesburg.
- Bieniawski, Z. T. (1978). Determining rock mass deformability: Experience from case histories. *Int. J. Rock CSMRS Mechanics Mineral Science & Geomechanics Abstract, 15, 237-247*.
- Bieniawski, Z. T. (1988). The rock mass (RMR) system (geomechanics classification) in engineering practice. 17-34. Philadelphia.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. junho: Wiley.
- Bienniawski, Z. (1967). Mechanism of brittle rock fracture: part I - theory of the fracture process. *International journal of mechanics and mining sciences e Geomechanical abstracts*.
- Bock, H. (2006). Common ground in engineering geology, soil mechanics and rock mechanics: past, present and future. *Bull Eng Geol Env, 209-216*.
- Borges, S. (2002). Apontamentos de Geologia Estrutural. *Faculdade de Ciências da Univercidade do Porto*.
- Brady & Brown, B. &. (2004). *Rock Mechanics for underground mining*. Kluwer Academic Publishers.
- Brown, E. T. (1991). Da teoria à prática em mecânica das rochas. *Ingenium, 9-29*.
- Calle, J. A. (2000). Análise de ruptura de talude em solo não saturado. *Disertação de Mestrado*. São Carlos.
- Cenorgeo, E. G. (julho de 2010). Projecto de Execução de Estabilização do Talude Sobranceiro à E.R. 222 no Sítio da ateira, no concelho da Ponta do Sol.
- CFCFF, C. o. (1996). *Rock Fractures and Fluid Flow: Contemporary Understanding and Applications*.
- Costa e Silva, M. M., Falcão Neves, A. P., Caranhola Pereira, H., & Reis e Sousa, M. (2001). CRITÉRIOS PARA A CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE MACIÇOS. *Congresso de Engenheiros, Ordem dos Engenheiros*. Vidago.
- Davis, G. H., Reynolds, S. J., & Kluth, C. F. (2011). *Structural Geology of Rocks and Regions, 3rd Edition*. Wiley.

- Deere, D. U., & Miller, R. P. (1966). Engineering classification and index properties for intact rock.
- Eberhardt, D. E. (Abril de 2003). Rock Slope Stability Analysis . *Earth and Ocean Sciences at UBC*. Vancouver canada.
- Eurocódigo 7 - projeto geotécnico. (2010). *Norma Europeia*.
- Europeus, S. R. (2016). <http://www.madeira.gov.pt/srape/Pesquisar/ctl/ReadInformcao/mid/717/InformacaoId/12923/UnidadeOrganicaId/2>.
- Feijó, R. J. (2007). Monitorização de uma escavação experimental grampeada em solo residual gnássico não saturado. *Tese de doutoramento, Universidade Federal do Rio de Janeiro*.
- Ferrer, M., & Vallejo, L. I. (2007). *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Floque, J. (1989). Algumas notas sobre solos reforçados. *LNEC*. Lisboa.
- Franco, G. B., Gomes Marques, E. A., Calijuri, M. L., & Gomes, R. L. (setembro de 2010). Cartografia Geotécnica: Estágio atual do conhecimento. *Caminhos de Geografia- revista on line*, 158-172.
- Giani, G. P. (1992). *Rock Slope Stability Analysis*.
- Gonçalves, J. A. (Janeiro de 2013). Estabilidade de fundações e taludes em maciços rochosos. *Disertação de Mestrado em Engenharia Civil - Perfil Geotecnia*.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuno, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geología*. Madrid.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics, second edition*. Wiley.
- Grossmam, C. L. (1996). Acerca dos limites de confiança dos parâmetros das famílias de diaclases. *Geotecnia nº76*.
- GSE. (1995). The description and classification of weathered rocks for engineering purpose. *Quarterly Journal of Engineering Geology, Geological Society*, 28, 207-242.
- Hack, R. (1998). *Slope Stability Probability Classification SSPC*. (2. edição, Ed.) Netherlands: ITC publication number 43.
- Hoek, &, & Brown. (1980). Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *J Geotech Eng ASCE*.
- Hoek, E. (2006). *Practical Rock Engineering*. 341.
- Hoek, E., Kaiser, P., & Bawden, W. (1995). *Support of Underground Excavations in Hard Rock*.
<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABkBOAB/apostila-mecanica-das-rochas?part=2>. Obtido em 10 de Novembro de 2016
- https://www.researchgate.net/figure/281749198_fig4_Figura-10-Diagrama-de-roseta-com-as-direcoes-das-fraturas-de-extensao-analisadas-na. Obtido em 10 de Novembro 2016
- http://bio-geo-tudo-o-que-precisas-de-saber.blogspot.pt/2013_05_01_archive.html. Obtido em 20 de Maio de 2016
- <https://cienciasbemexplicadas.files.wordpress.com/2013/03/tipos-de-falhas.png>. Obtido em 20 de Maio de 2016
- <http://www.geradordeprecos.info/imagenes/CYA482.jpg>. Obtido em 17 de Junho de 2016
- Hudson, J. A. (1993). *Rock Testing and Site Characyerization* (Vol. 3). Pergamon Press.

- IAEG, i. a. (1981). Recommended symbols for engineering geological mapping. *Bulletin IAEG N°24*, 227-234.
- IAEG, i. a. (1981). Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. *Bulletin IAEG N°24*, 235-274.
- ISRM. (1978). *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*.
- ISRM. (1981). *Basic geotechnical description of rock masses*.
- Katz, O., Reches, Z., & Roegiers, J. (2000). Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer. *J Rock Mech Min Sci*.
- Maia, J. A. (Março de 2003). Métodos probabilísticos aplicados à estabilidade de taludes e cavidades em rocha. Faculdade de tecnologia Universidade de Brasília.
- Mendes, M. F. (1968). Mecânica das rochas. *Instituto Superior Técnico*. Lisboa.
- Miguel, D. M. (2012). Análise de estabilidade de taludes recorrendo a programas de cálculo, aplicação a um caso prático. *Disertação de Mestrado*. Funchal.
- Miranda, T. (2003). Contribuição para a obtenção de parâmetros geomecânicos para a modelação de obras subterrâneas em maciços graníticos. *Tese de Mestrado em Engenharia Civil*. Universidade do Minho.
- Miranda, T., Correia, A. G., & Ribeiro e Sousa, L. (2006). Determinação de Parâmetros Geomecânicos em Formações Rochosas e Maciços Heterogéneos. *Engenharia Civil nº 25*.
- Oliveira, A. M., & Alves de Brito, S. N. (1998). *Geologia de Engenharia*.
- Oliveira, R. (10 de Março de 2010). Geologia de Engenharia. Génese, evolução e situação actual. *Geotecnia*, 3-13.
- Oliveira, R. (2012). *Geologia de Engenharia da Universidade Nova de Lisboa*.
- Oliveira, R. P., Almeida, A. B., Sousa, J., Perreira, M. J., Portela, M. M., Coutinho, M. A., . . . Lopes, S. (2010). *A AVALIAÇÃO DO RISCO DE ALUVIÕES NA ILHA DA MADEIRA*.
- Palmstrom, A. (1985). Application of the volumetric joint count as a measure of rock mass jointing. *Fundamentals of Rock Joints*, 103-110.
- Palmstrom, A. (1995). *RMI- a rock mass characterization system for rock engineering purposes*. Universidade de Oslo.
- Palmstrom, E. (2005). Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD).
- Pereira, J. J. (1985). Caracterização geotécnica de maciços rochosos. *Dissertação de Mestrado*.
- Perneta, J. P. (Dezembro de 2010). Caracterização Geológica e Geotécnica dos Complexos Vulcânicos Antigo e Intermédio da Ilha da Madeira . *Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil* .
- Priest & Hudson. (1976). Discontinuity Spacings in rock. pp. 135-148.
- Priest, S. D. (1993). *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Chapman & Hall.

- Requetim, L., Pinho, A., Duarte, I., Lopes, L., & Valente, A. (2006). Análise da Estabilidade de um Talude de Escavação em Odemira. *VII congresso nacional de geologia*.
- Ribeiro, M. L., & Ramalho, M. (2007). Uma visita geológica ao arquipélago da madeira: principais locais geoturísticos.
- Rocha, M. (1981). *Mecânica das Rochas*. LNEC.
- Rock, I. -I. (1987). Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks.
- Rocscience. (19 de Outubro de 2016). www.rocscience.com/rocscience/products/slide/resources/tutorials.
- Rodrigues, E. S. (2013). ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE DOIS TALUDES ROCHOSOS GRANÍTICOS.
- Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *International Symposium on the role of rock mechanics*, 49-53.
- Romana, M. (1993). *A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating*.
- Salamuni, E. (s.d.). Geologia Estrutural (Aulas 5) Fraturas: Juntas e Falhas.
- Selby, M. (1980). A rock mass strength classification for geomorphic with tests from Antarctica and New Zealand. *Zeitschrift für Geomorphologie*.
- Sen, Z., & Sadagah, B. H. (2003). Modified rock mass classification system by continuous rating. *Engineering Geology*, 67, 269-280.
- Serafim, J. L., & Pereira, J. P. (1983). Considerations on the geomechanical classification of Bieniawski. *Proc. Int. Symp on Eng. Geol. and Underground Construction, I (II)*, 33-34. Lisboa, Portugal.
- Simons, N., Menzies, B., & Matthews, M. (s.d.). *Soil and rock slope engineering*. Thomas Telford.
- Singh, B., & Goel, R. (1999). *Rock Mass Classification - A Practical Approach in Civil Engineering*. Elsevier.
- Tomás, R., Cano, M., Cañaveras, J., Cuencas, A., Delgado, J., Estévez, A., & Pina, J. (2006). Nuevas funciones continuas para el cálculo del slope mass rating (SMR): aplicación mediante un sistema de información geográfica a los taludes rocosos de una cantera. *Revista de la Sociedad Geológica de España*.
- TVI24. (29 de 11 de 2013). <http://www.tvi24.iol.pt/sociedade/iol-push/madeira-moradores-do-porto-da-cruz-contam-estragos>.
- Ulusay, R., & Hudson, J. (2007). *The complete isrm suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006*.
- Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering - Civil and Mining*. Spon Press.

Anexo A – Valores da constante m_i

Tabela A - 1 Valores da constante m_i (adaptado de Miranda T. , 2003)

Tipo de rocha	Classe	Grupo	Textura			
			Grosseira	Média	Fina	Muito fina
Sedimentar	Clástica		Conglomerado (22)	Arenito 19	Siltito 9	Argilito 4
			Grauvaque (18)			
	Não-Clásticas	Orgânicas	Giz (18) Carvão (8-21)			
		Carbonatadas	Brecha (20)	Calcário compacto (10)	Calcário grosseiro 8	
		Químico		Gesso 16	Anidrite 13	
Metamórfica	Não-foliada		Mármore 9	Corneana (19)		
	Ligeiramente Foliada		Migmatito (30)	Anfibolito 31	Milonito (6)	
	Foliada *		Gnaisse 33	Xisto (10)	Filite (10)	Ardósia 9
Ígnea	Clara		Granito 33		Riólito (16)	Obsidiana (19)
			Granodiorito (30)		Dacito (17)	
			Diorito (28)		Andesite 19	
	Escuro		Gabro 27	Dolerito (19)	Basalto (17)	
			Norite 22			
	Tipo piroclástica extrusiva		Aglomerado (20)	Brecha (18)	Tufo (15)	

Notas: i) Os valores entre parênteses são estimados;

ii) Os valores assinalados com (*) são para amostras de rocha ensaiadas numa direção normal à estratificação.

Anexo B – Planta e alçados geologia

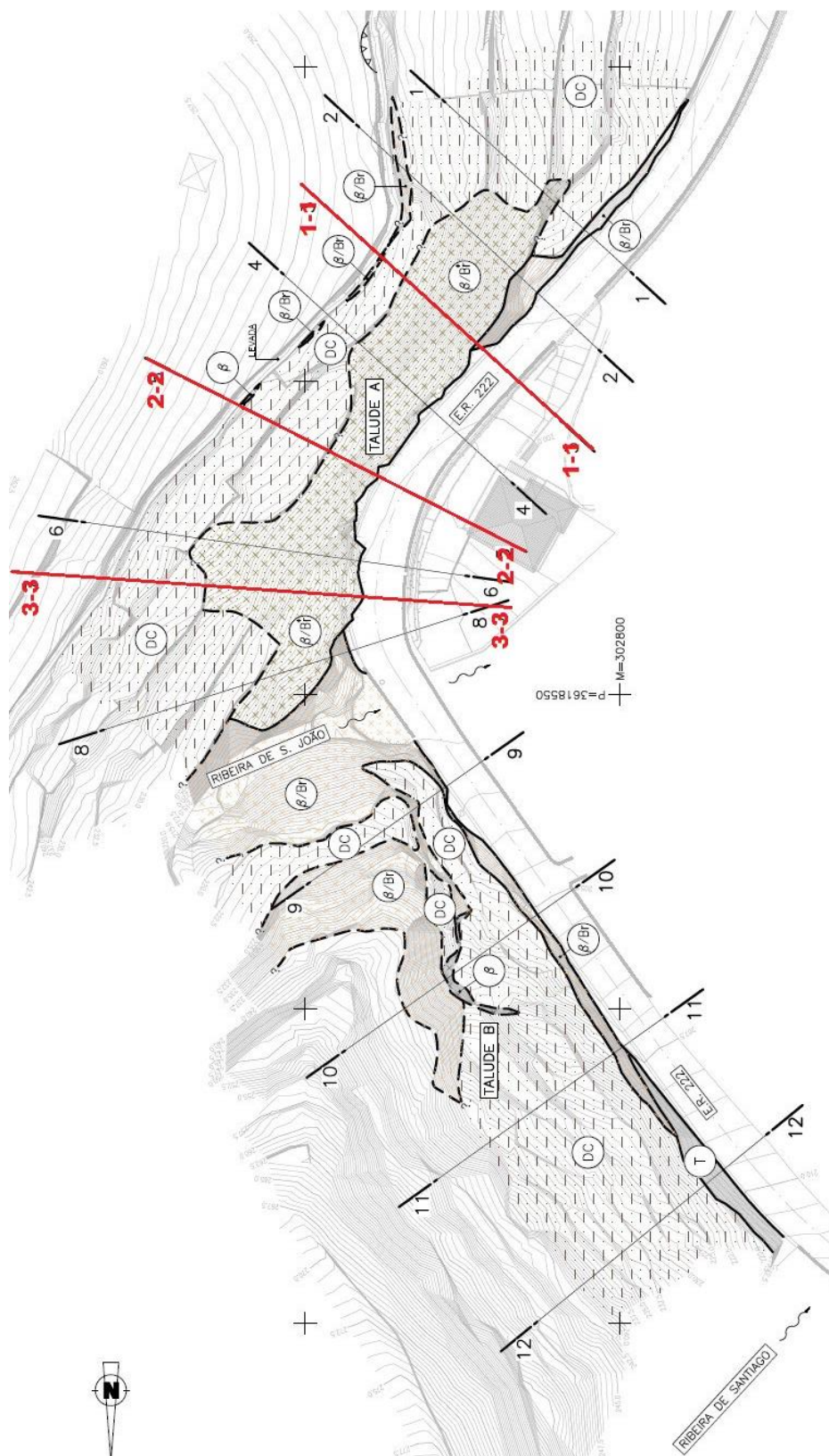


Figura B - 1 Planta geológica (adaptado de Cenorge, 2010)

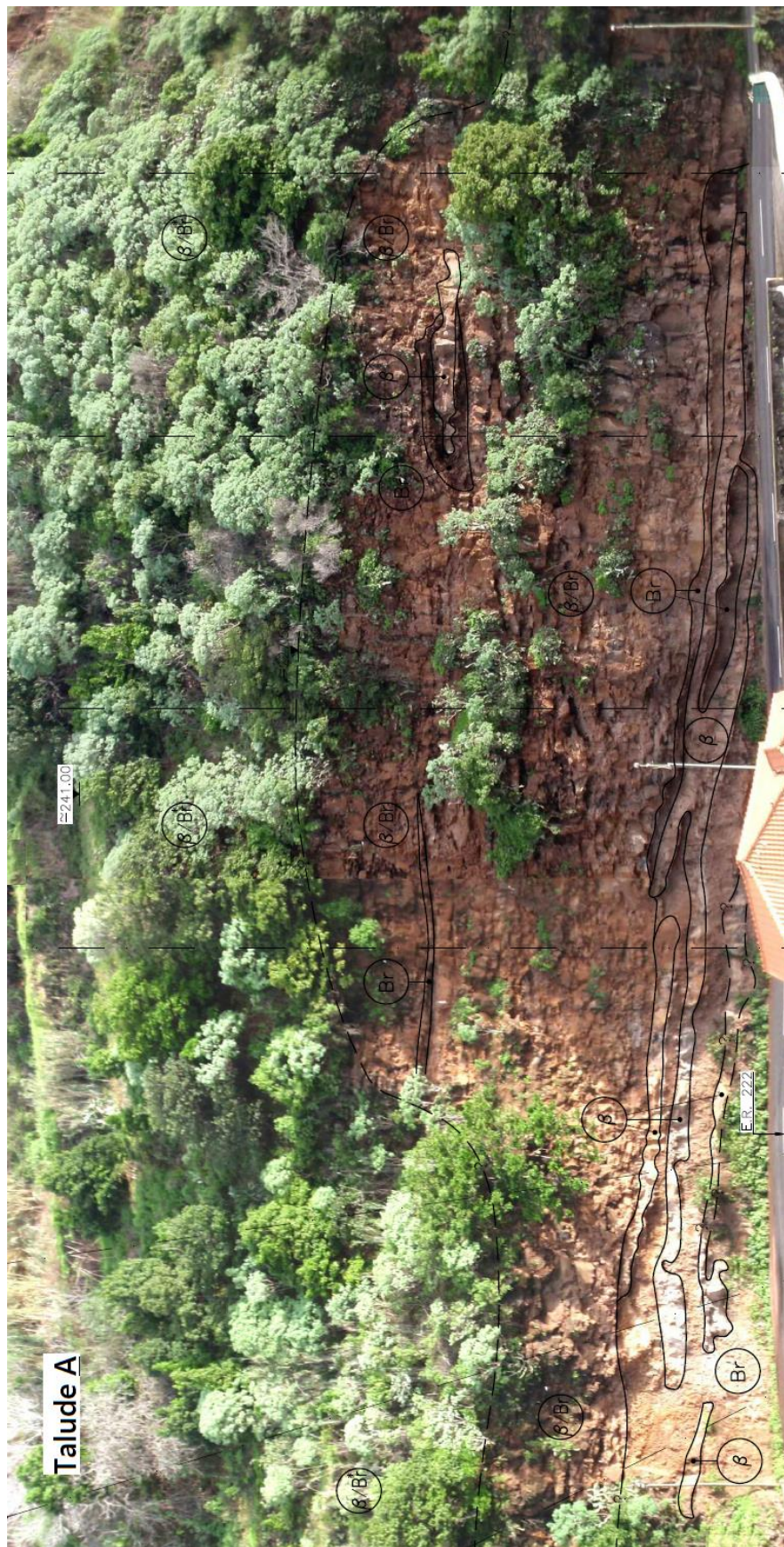
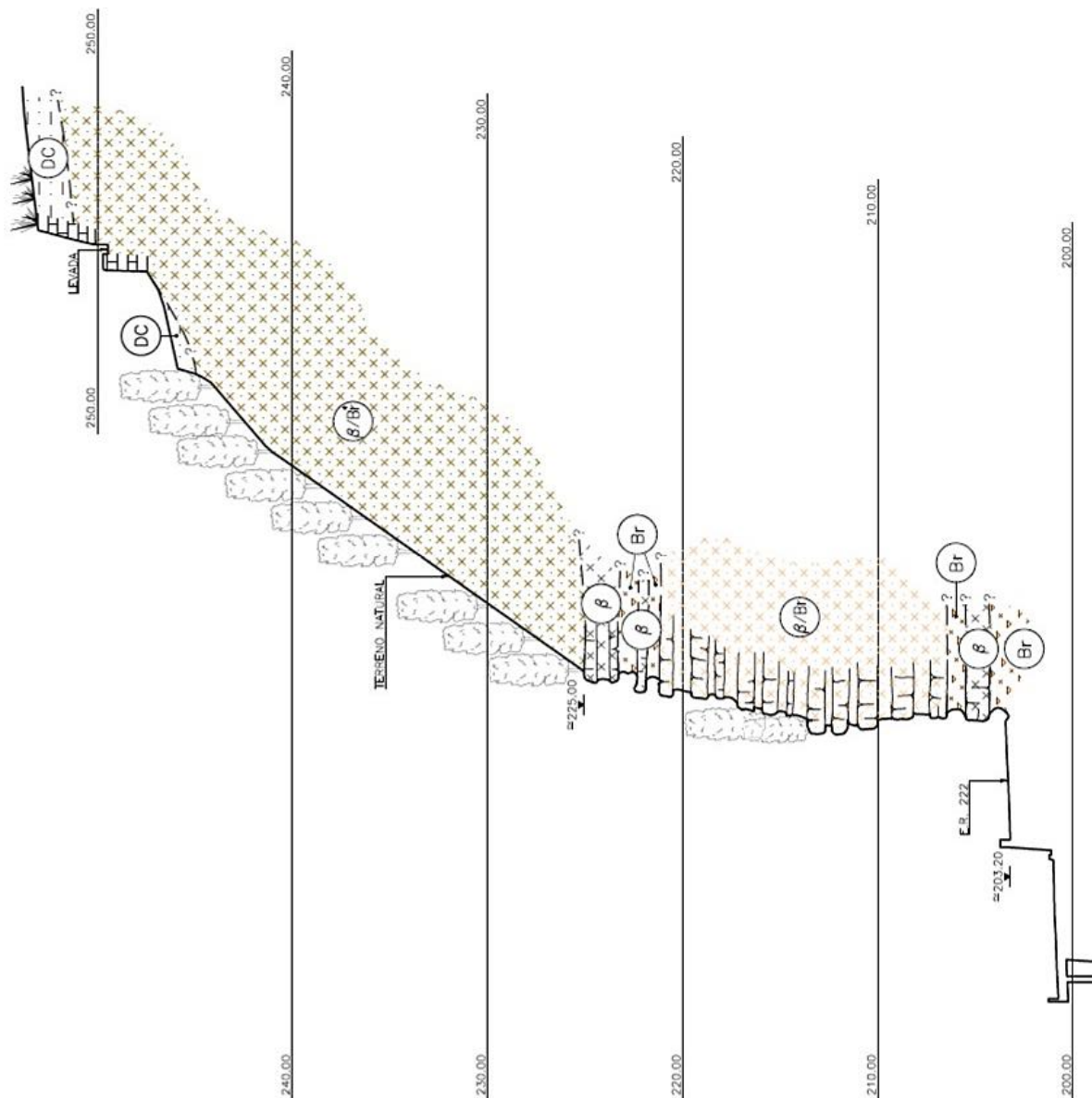


Figura B - 2 Alçado geológico do talude A



Figura B - 3 Alçado geológico do talude B

Anexo C – Cortes geológicos transversais esquemáticos



Corte 1-1



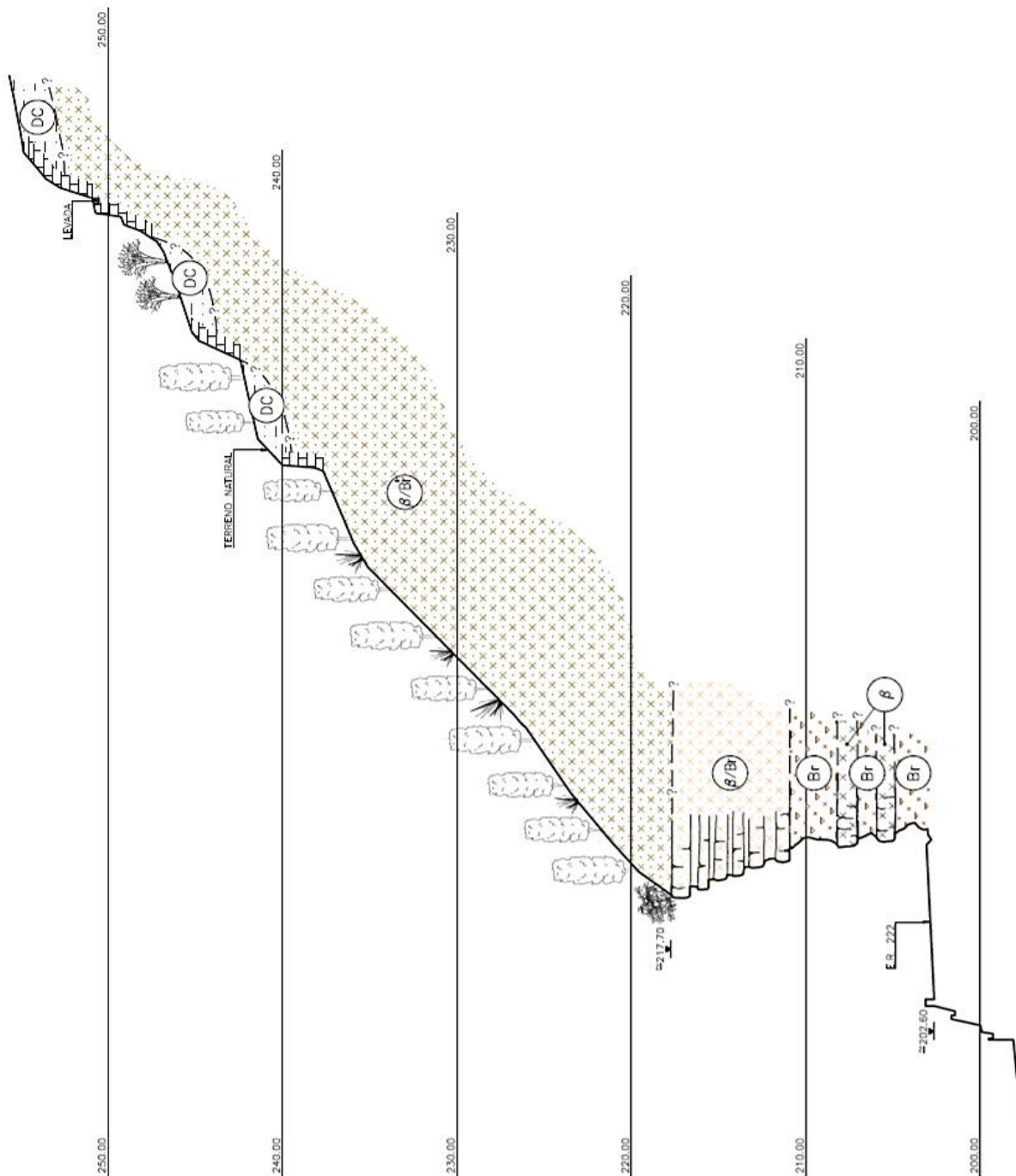
Figura C - 1 Corte geológico 1-1 (adaptado de Cenorge, 2010)



Corte 2-2



Figura C - 2 Corte geológico 2-2 (adaptado de Cenorgeo, 2010)

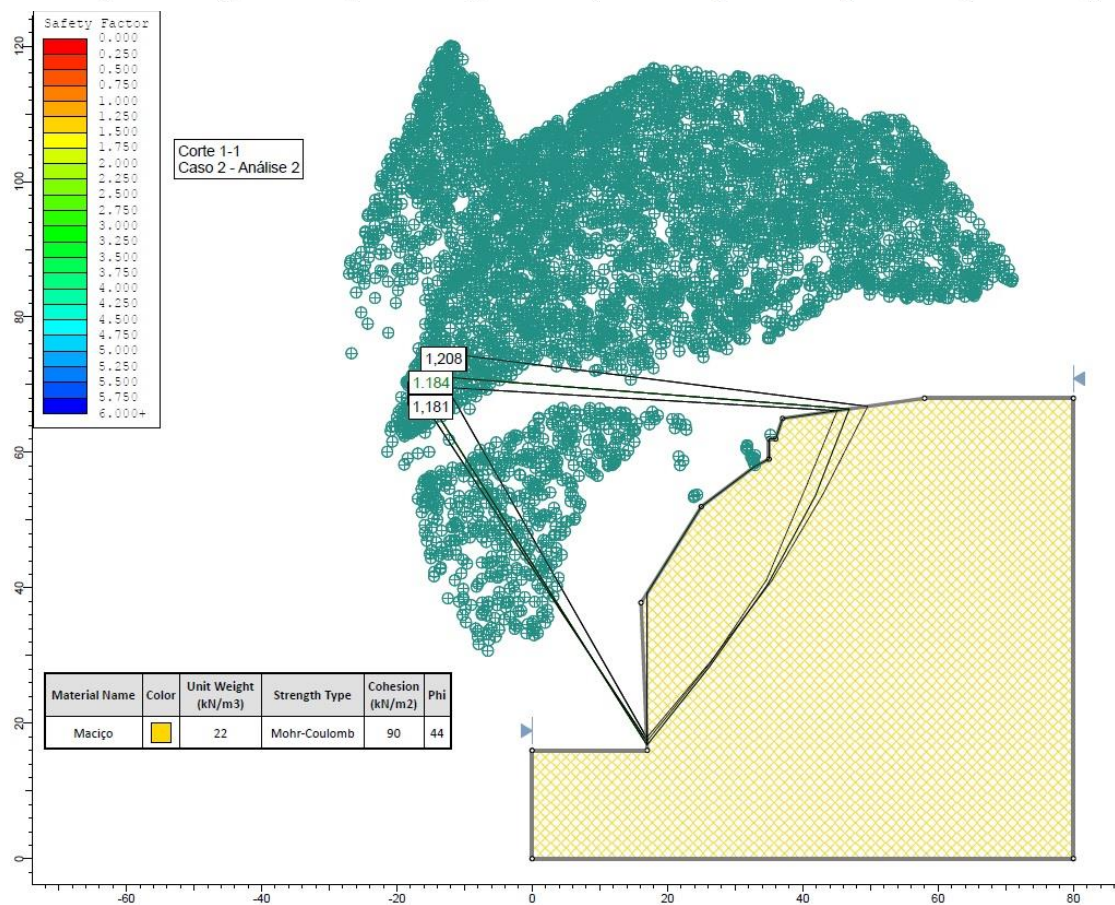
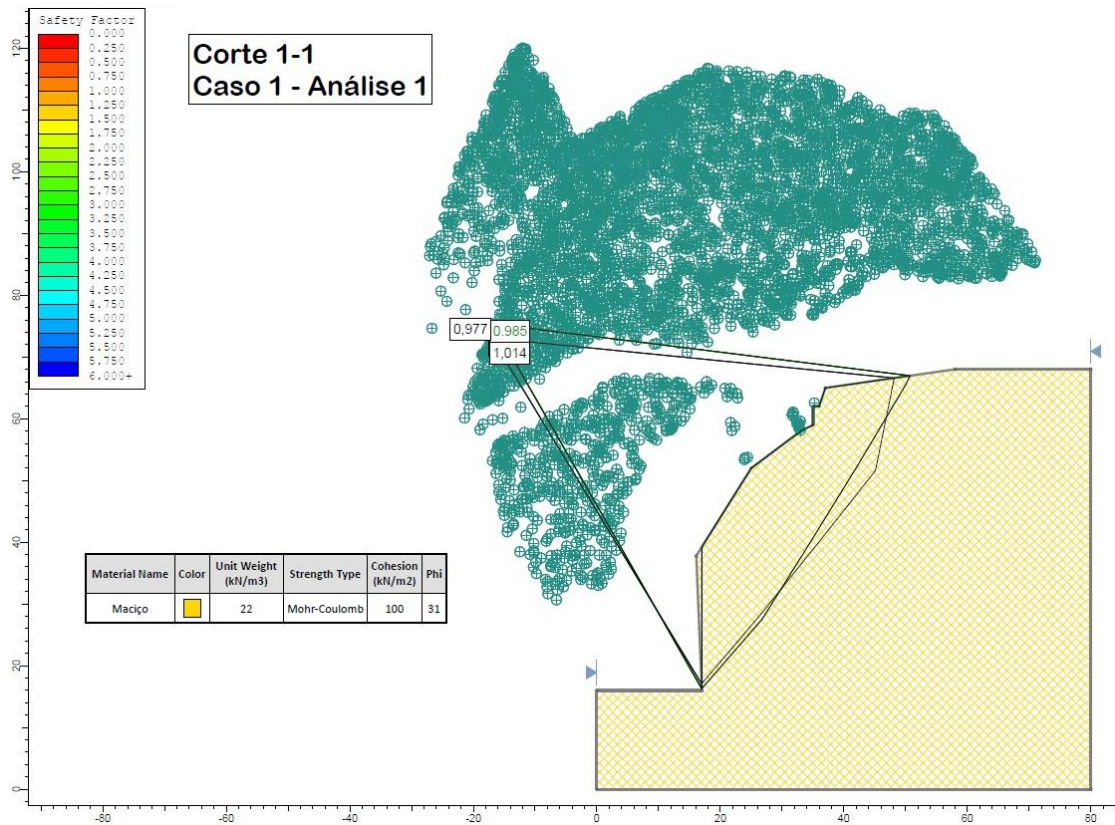


Corte 3-3

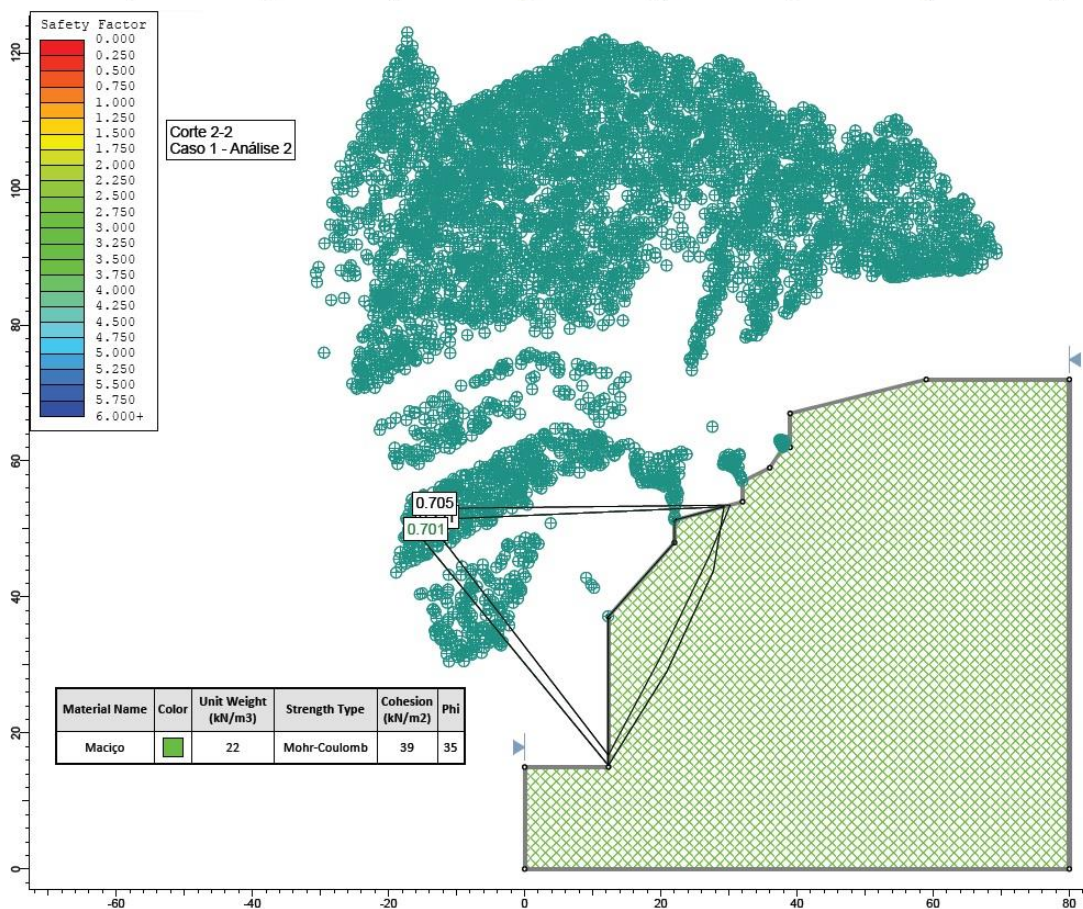
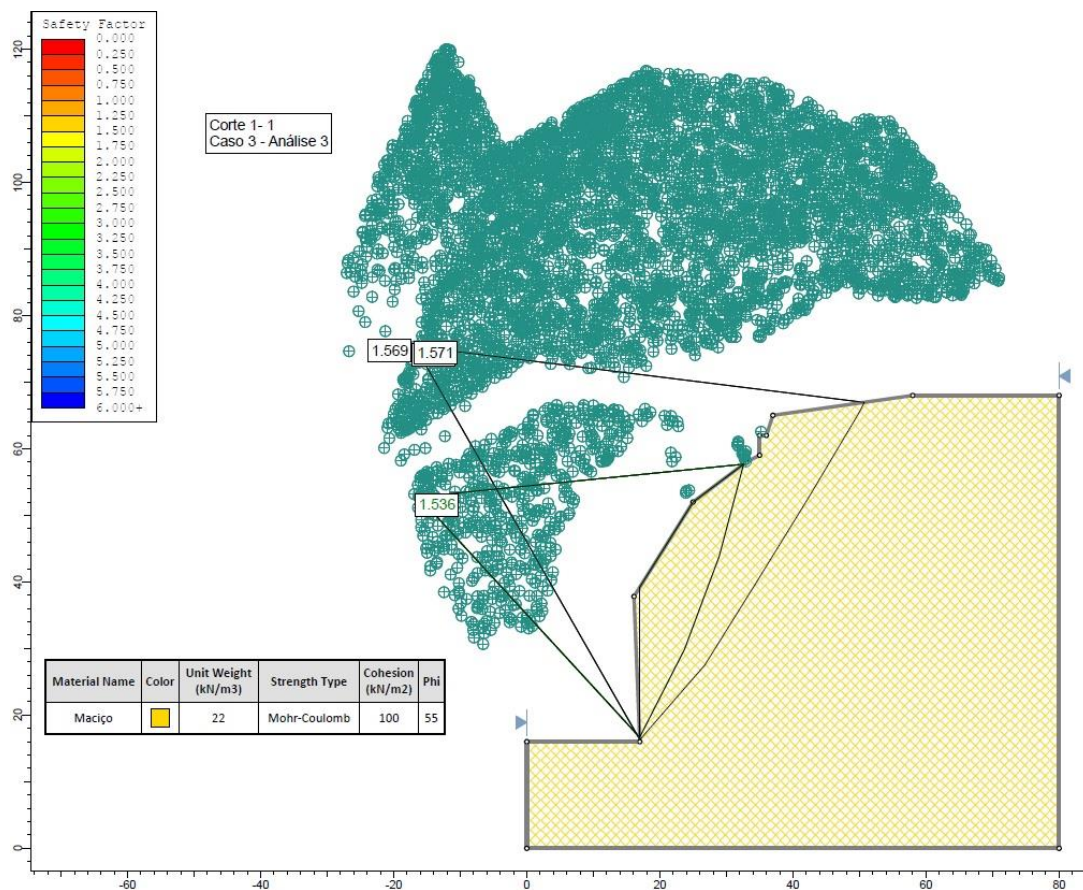


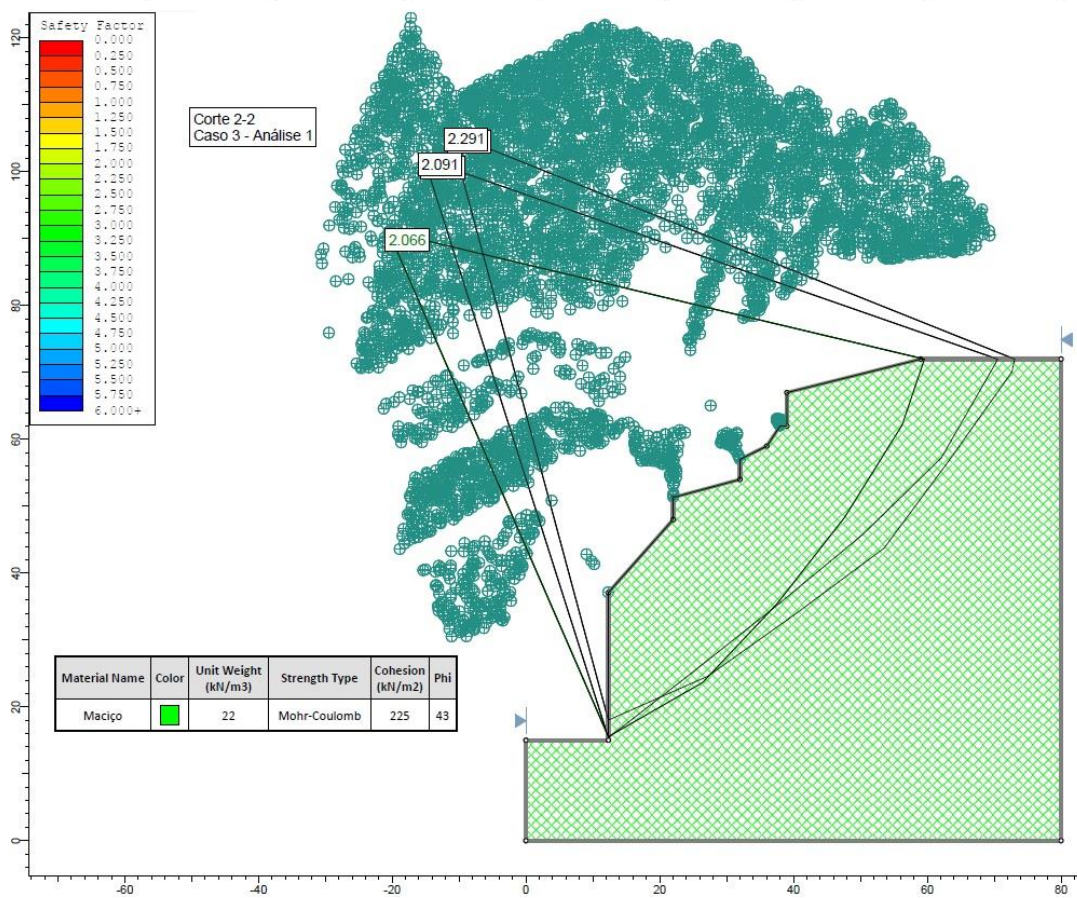
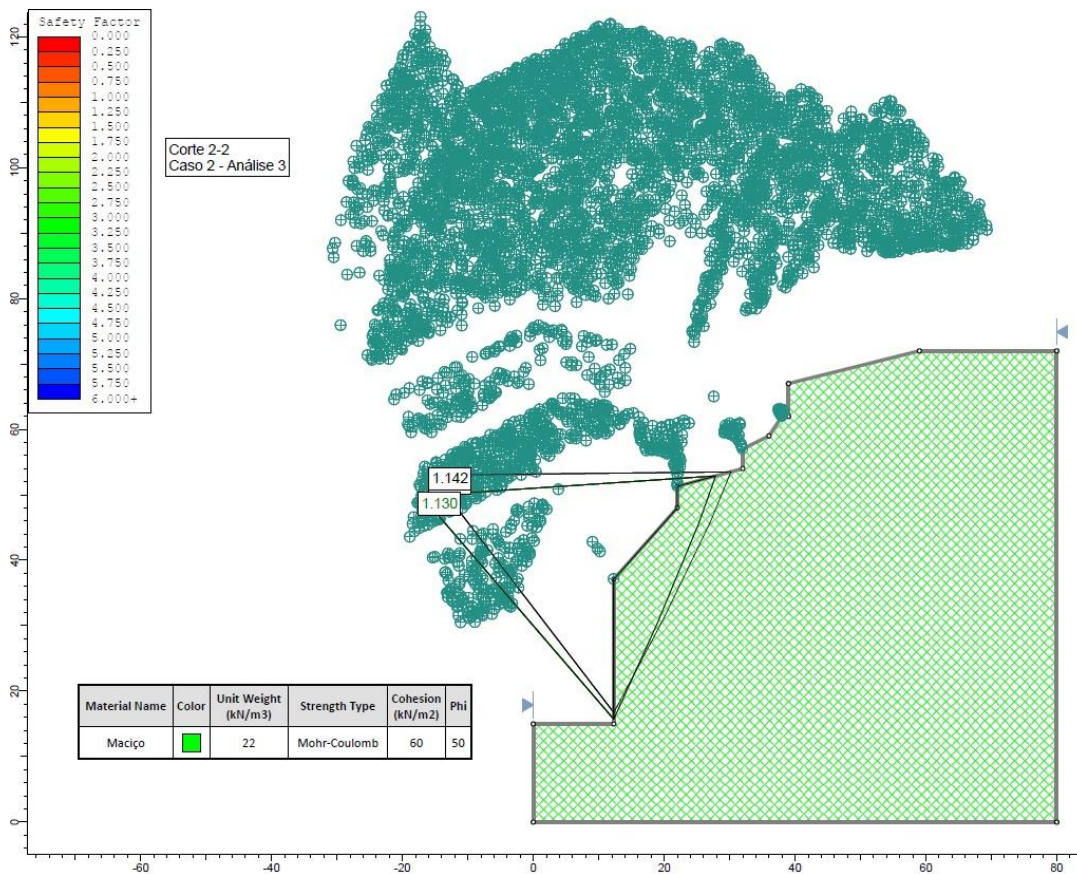
Figura C - 3 Corte geológico 3-3 (adaptado de Cenorge, 2010)

Anexo D – Alguns exemplos do cálculo do fator de segurança pelo SLIDE 6.0

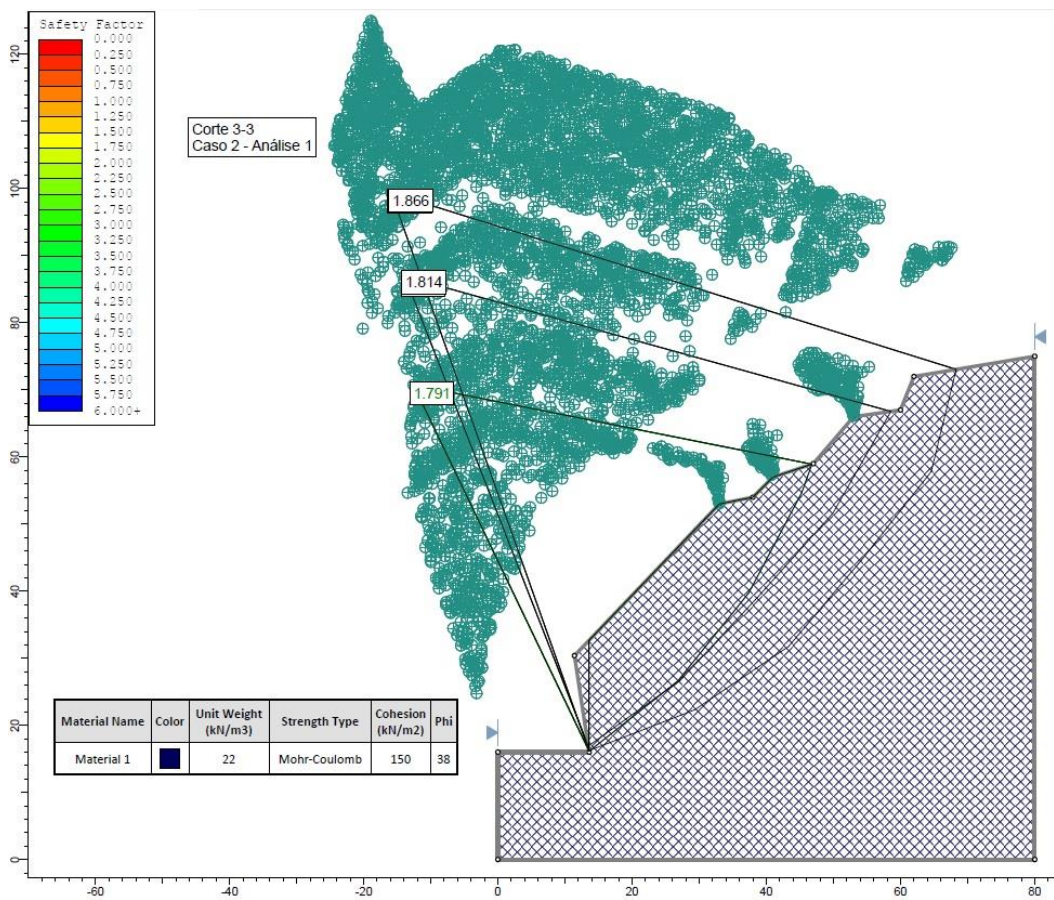
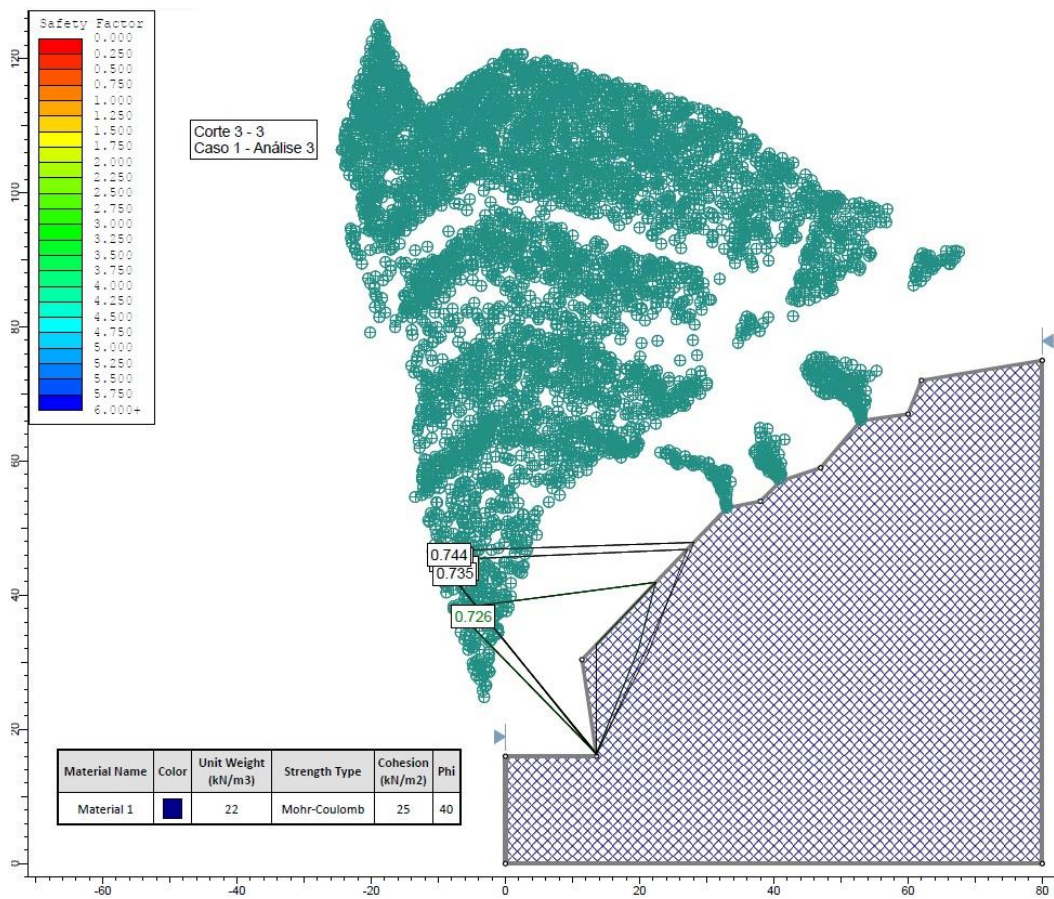


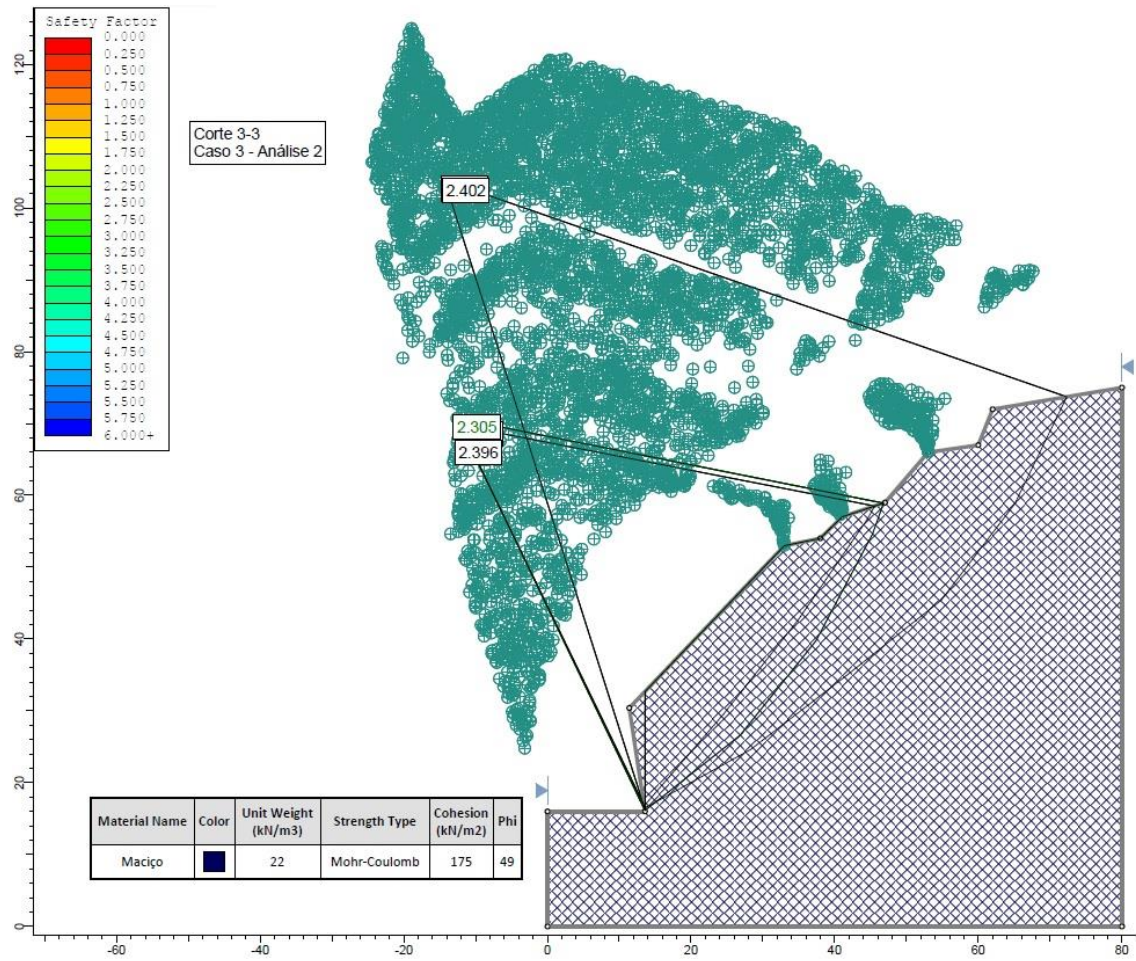
Anexo D – Alguns exemplos do cálculo do fator de segurança pelo SLIDE 6.0



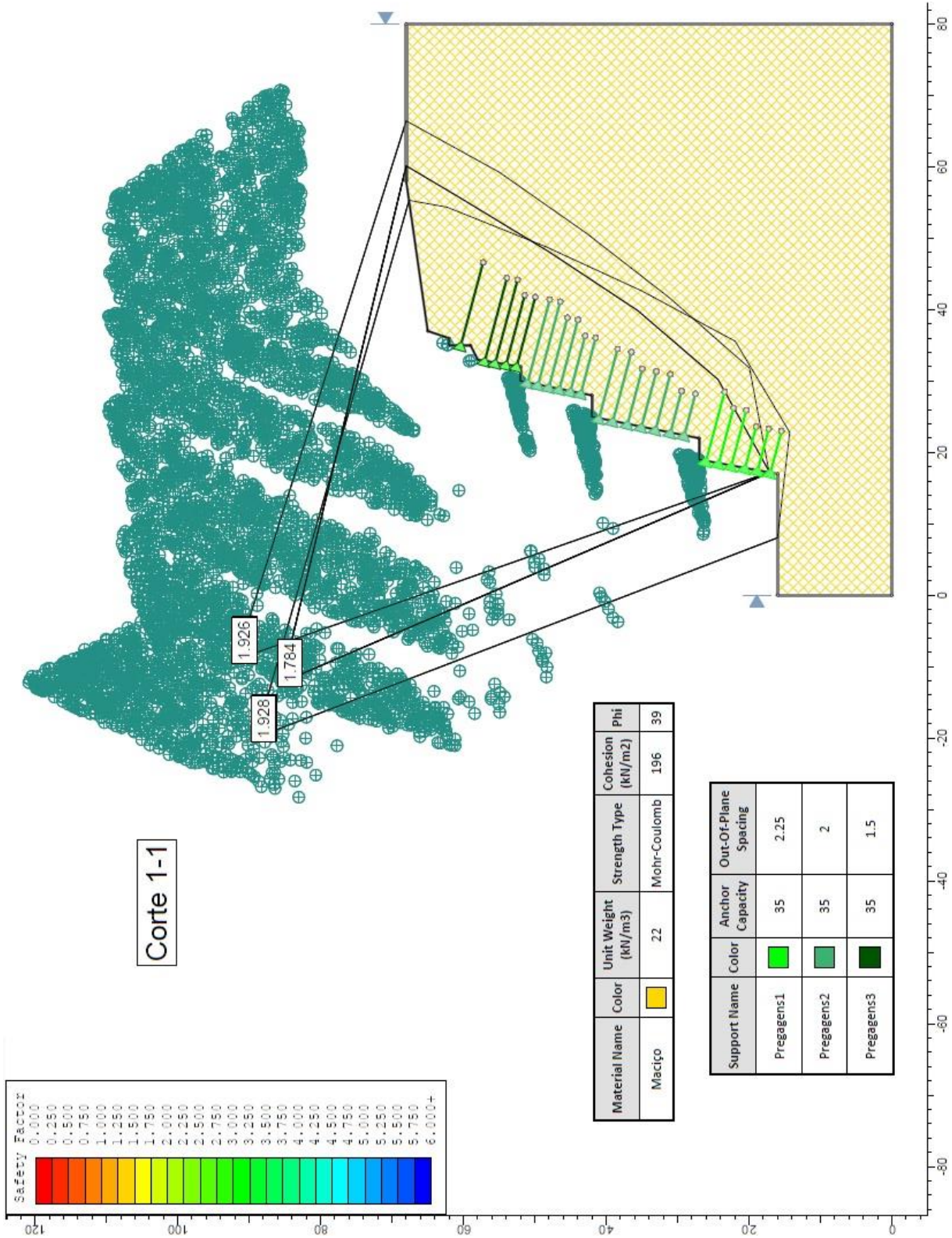


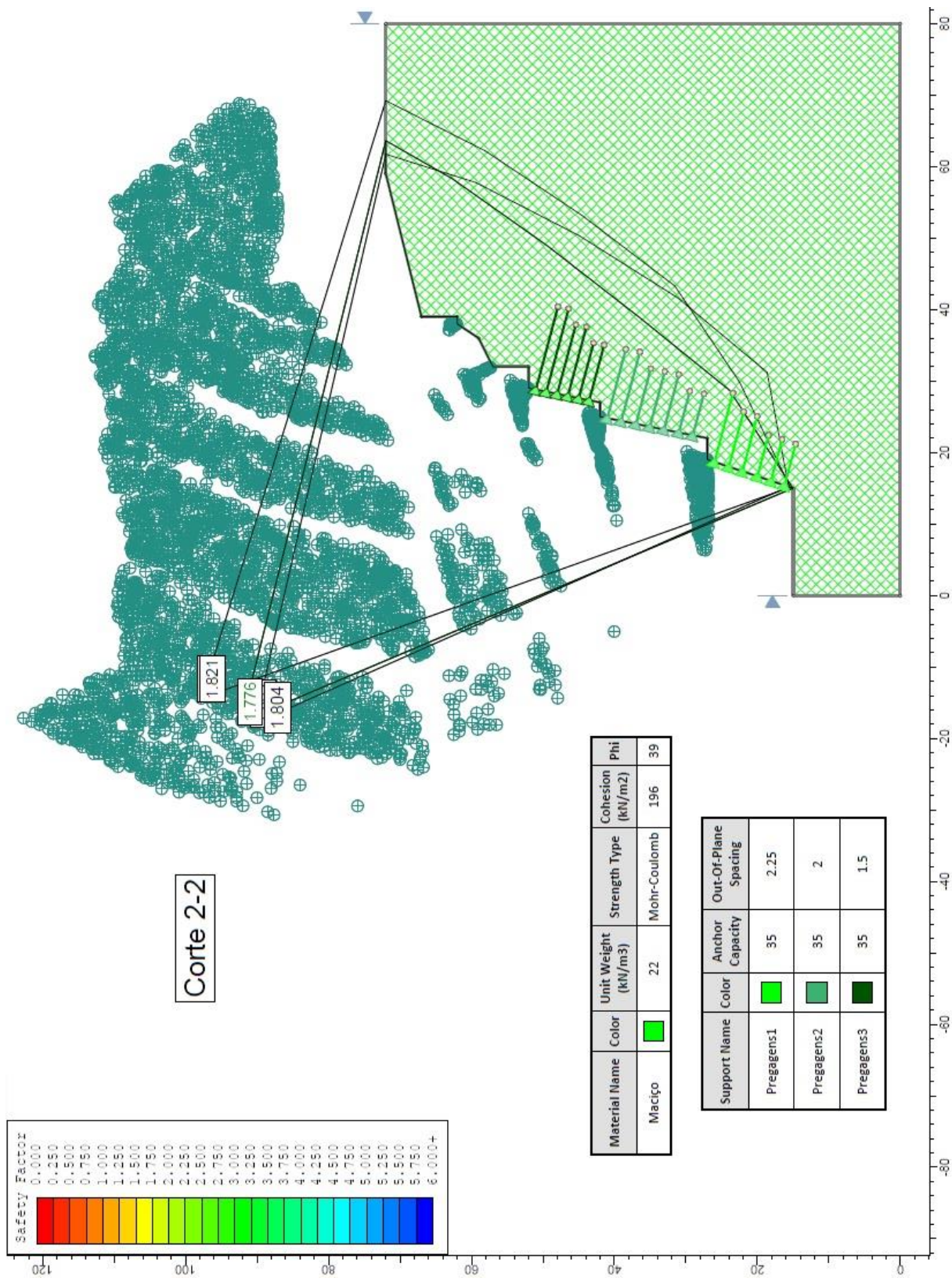
Anexo D – Alguns exemplos do cálculo do fator de segurança pelo SLIDE 6.0

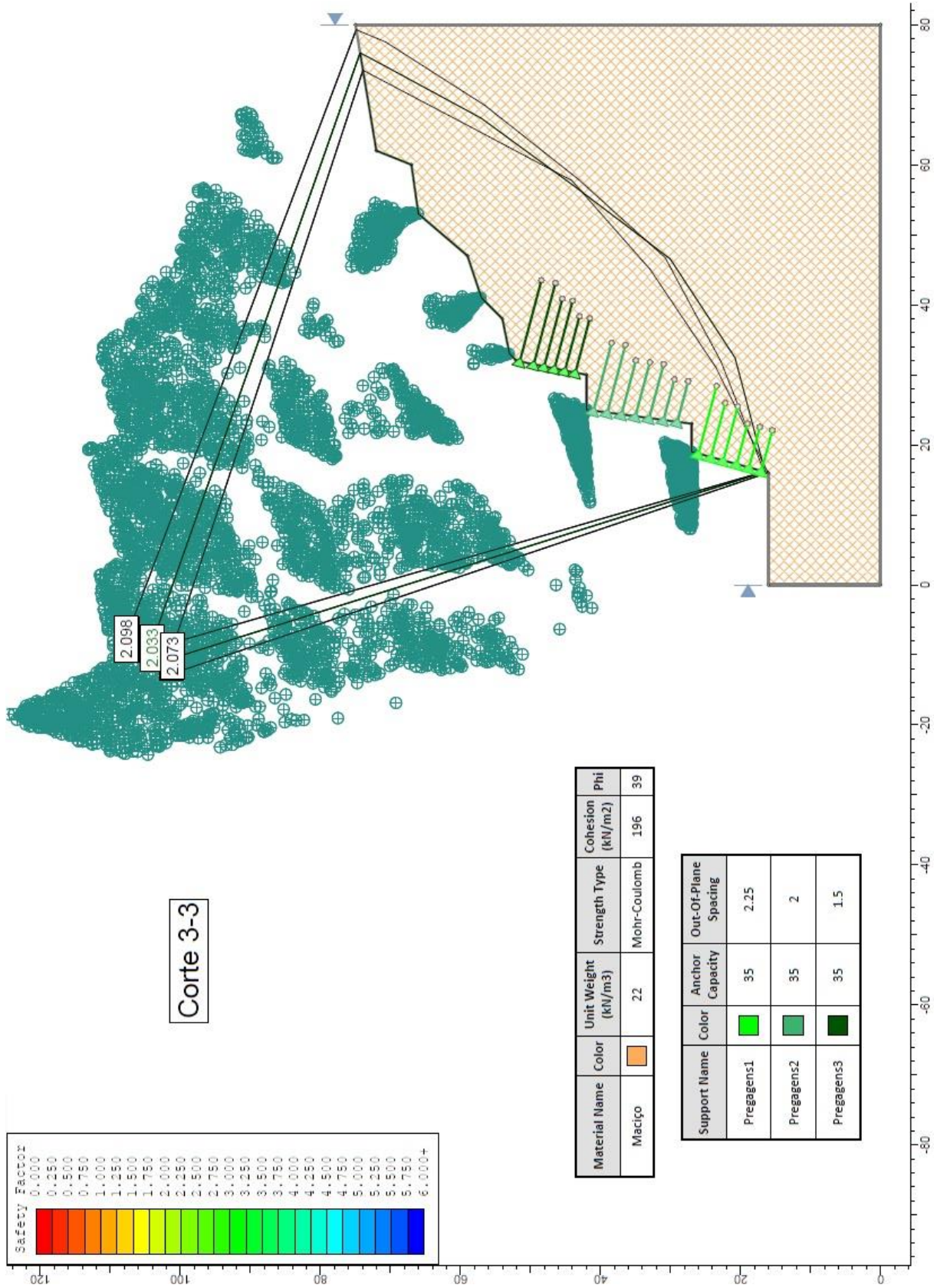




Anexo E – Cálculo da estabilidade global







Anexo F – Fotos da execução da estabilidade do talude A



Anexo F – Fotos da execução da estabilidade do talude A















Anexo G – Fotos da execução da estabilidade do talude B









