



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA



Cartografia geomecânica de vertentes rochosas (S. Simão, Amarante): estudos de perigosidade geotécnica

Rui Pedro Martins Machado

isep Instituto Superior de
Engenharia do Porto



LABCARGA
LABORATÓRIO DE CARTOGRAFIA
E GEOLOGIA APLICADA

P. PORTO

2016

(página propositadamente em branco)



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Cartografia geomecânica de vertentes rochosas (S. Simão,
Amarante): estudos de perigosidade geotécnica**

Rui Pedro Martins Machado

1101509

*Projeto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizado sob a orientação do Doutor Helder I. Chaminé, Professor Coordenador com Agregação do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e coorientação da Doutora Maria José Afonso, Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP*

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé
Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José Augusto Alves Teixeira
Professor Auxiliar, Departamento de Geografia, Faculdade de Letras da Universidade do Porto

Mestre Especialista José Filinto Castro Trigo
Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutora Maria José Coxito Afonso
Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto

A tese de mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG) foi apresentada e defendida em prova pública, pelo Licenciado Rui Pedro Martins Machado, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 12 de Outubro de 2016 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de 18 (dezoito) valores, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.

Agradecimentos

Não poderia começar a exposição desta tese sem enumerar as diversas pessoas que me acompanharam nesta fase de extrema relevância no meu percurso curricular e pessoal, que me ajudaram, de forma direta e indireta, a tornar-me uma pessoa mais preparada para esta nova fase que se aproxima e que se espera ser de sucesso, trabalho e muita aprendizagem.

Ao meu orientador, Professor Helder I. Chaminé (DEG e LABCARGAIISEP), por toda a colaboração na elaboração da minha tese, acompanhamento de campo prestado, revisão de toda a estrutura e conteúdos da tese e, principalmente, pelo profissionalismo demonstrado ao longo de todo o meu percurso curricular.

À minha co-orientadora, Professora Maria José Afonso (DEG e LABCARGAIISEP), pelo apoio prestado em vários momentos de redação da tese, principalmente nos trabalhos de campo e análise dos dados, sem esquecer também o profissionalismo e os vários ensinamentos ao longo de todo o meu percurso académico.

Ao Engenheiro José Filinto Castro Trigo (DEC), por toda a ajuda prestada nas primeiras intervenções na fase de campo, bem como nas modelações finais e revisão do documento relativo à modelação geotécnica.

Ao Doutor J. Teixeira por todo o apoio ao longo da tese nas várias intervenções com *softwares*, mas principalmente pela cordialidade e simplicidade com que sempre se mostrou disponível para ajudar em todos os momentos.

À Dra. Liliana Freitas (LABCARGAIISEP) por toda a colaboração e apoio na cedência de conteúdos para a minha tese, pela ajuda nas atividades de campo e na vectorização de algumas imagens, mas também, pela enorme simpatia, simplicidade e humildade sempre demonstrada.

À Câmara Municipal de Amarante, em particular ao Sr. Vice-Presidente Prof. Doutor Jorge Mendes, por todo apoio e permissão de utilização de muitos dados referentes ao estudo multidisciplinar da vertente rochosa de S. Simão.

Uma palavra de apreço aos centros de prestação de serviços do ISEP (Núcleo de Estudos da Construção – NEC e Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada – LABCARGA) por todas as facilidades e apoio laboratorial diverso sem o qual não teria sido possível realizar esta investigação.

Grato à moradora do local do Casal, freguesia de S. Simão, Sra. D. Maria Pereira, pela simpatia genuína em ter-nos sempre recebido devidamente equipada com as suas intrépidas galochas, bem como pelas partilhas desde os primeiros reconhecimentos e várias subidas à “sua íngreme escarpa de S. Simão”.

Ao colega José Miguel Ribeiro, Engenheiro Geotécnico, pelo precioso auxílio na fase de arranque da investigação aquando dos levantamentos geotécnicos de pormenor.

Ao colega Carlos Pacheco, Engenheiro Civil, por todo o apoio na fase de campo durante o ano de 2015, bem como na cedência de alguns documentos fundamentais para a elaboração da tese.

Ao colega Pedro Ferraz, Engenheiro Civil, por toda a cooperação na fase final da minha tese, no apoio à realização da modelação com programa de cálculo automático *Rocfall*, pela grande disponibilidade demonstrada e ajuda fundamental em todos os momentos do referido trabalho.

Para além dos agradecimentos anteriormente referidos serão também importantes de realçar todos aqueles que me acompanharam no meu percurso académico, incluindo professores e colegas; todos eles, de formas várias, ajudaram-me na construção de um futuro profissional de engenharia geotécnica, bem como o companheirismo, a sinceridade e as vivências decorridas ao longo destes anos que irão permitir que me sinta mais preparado para o futuro com a esperança de me tornar um profissional de competência. Sem dúvida alguma que tive a felicidade de me cruzar, ao longo deste trajeto, com pessoas de enormíssimas qualidades e de quem sempre me recordarei com as melhores impressões e, por certo, bastante saudade.

Não poderia terminar os agradecimentos sem realçar o papel da minha família e amigos que fizeram, fazem e farão sempre parte da minha vida, e que, sem eles, nunca conseguiria ser quem sou de todos os pontos de vista, seja profissional, seja a nível pessoal. Foram todos eles que me moldaram, foi com eles que vivi os melhores momentos da minha vida e os que ainda virão. Quando as exigências e responsabilidades apertavam, e foram muitas, eles estavam presentes, a fazer com que pudesse voltar ao trabalho com outro estado de espírito e outra capacidade de total foco naquilo que teria de fazer.

A todos, um cordial muito obrigado...

Palavras-chave

Maçiços rochosos, geotecnia de taludes, queda de blocos, geomecânica, perigosidade, RocFall.

Resumo

Este trabalho pretende enfatizar a importância dos estudos geológicos, geotécnicos e geomecânicos para uma melhor compreensão da perigosidade geotécnica da vertente rochosa granítica de S. Simão (Amarante). Este estudo envolveu, numa primeira fase, a caracterização da área em questão, em termos topográficos, geológicos e morfoestruturais e, numa etapa posterior, a sua avaliação geotécnica e geomecânica. Foram compiladas e integradas as principais características cartográficas, geológicas, geotécnicas e geomecânicas da vertente rochosa granítica estudada, tendo-se recorrido à técnica da amostragem linear aplicada a superfícies expostas do maciço. Além disso, foi avaliada a resistência à compressão uniaxial do material-rocha com base no ensaio esclerométrico. Procedeu-se, ainda, a um tratamento estatístico das descontinuidades, bem como dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos associados. Com o intuito de classificar a qualidade do maciço rochoso, foram aplicadas as classificações geomecânicas RMR, GSI e SMR. A classificação SMR foi particularmente importante para avaliar a estabilidade da vertente e permitiu extrapolar os potenciais mecanismos de rotura. O teste de Markland foi também uma ferramenta muito útil para avaliar os potenciais processos de rotura nesta vertente. Para a avaliação da susceptibilidade e do nível de perigosidade da vertente rochosa de S. Simão foram aplicados o sistema RHRSm2 e o índice de qualidade de taludes SQI. Procedeu-se ainda, de forma exploratória, à modelação da queda de alguns blocos rochosos com recurso ao programa de cálculo automático “RocFall 5.0” (RocScience), analisando as respectivas trajetórias. Pretende-se que esta metodologia contribua para um melhor conhecimento da susceptibilidade e da perigosidade geotécnica de vertentes na região de Amarante e que esta possa ser aplicada na prevenção e predição da instabilidade de taludes rochosos.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Rock masses, slope geotechnics, rock fall, geomechanics, geohazards, RocFall.

Abstract

This work emphasizes the importance of a geological, geotechnical and geomechanical study to a better understanding of the granitic rock slope of S. Simão (Amarante) geotechnical hazard. This study involved, in a first stage, the characterization of the study area through topographic, geological and morphostructural criteria and, in a subsequent stage, the characterization throughout geotechnical and geomechanical assessment. The main geological, geotechnical and geomechanical constraints were compiled and integrated along the granitic slope. For this characterization, the scanline sampling technique of discontinuities has been applied to the study of free rock-mass faces. In addition, uniaxial compressive strength was estimated by means of Schmidt hardness test. In addition, the evaluation methods of field data for discontinuities sets and the statistical characterisation of all parameters are also presented. In order to classify the quality of the granitic rock mass, RMR, GSI and SMR geomechanics classification systems were applied. Slope Mass Rating (SMR) classification was also fundamental to assess the stability of this slope and to offer insights into the main potential local slope failure mechanisms. Markland test provided a useful tool to assess the type of failure most likely to occur in the study slope. For the evaluation of susceptibility and hazard level of S. Simão rocky slope RHRSm2 system and SQI index were applied. Also, in an exploratory manner, the fall of granite blocks was modeled using the software "RocFall 5.0" (RocScience), and their trajectories were analysed. This methodology proved valuable to a better understanding of susceptibility and geotechnical hazard of rock slopes in Amarante region and it could be applied to an accurate prediction of future slope instabilities.

(página propositadamente em branco)

Índice

1.	Introdução Geral	3
1.1.	Âmbito e Enquadramento do Tema	3
1.2.	Enquadramento Histórico: Breve Descrição do Acidente	5
1.3.	Objetivos	6
1.4.	Organização	7
2.	Metodologias e Técnicas	11
3.	Geotecnia e Geomecânica de Taludes Rochosos	21
3.1.	Generalidades	21
3.2.	Compartimentação de Maciços Rochosos	22
3.2.1.	Reconhecimento Geológico	22
3.2.2.	Cartografia de Zonamento Geotécnico	23
3.2.3.	Parâmetros dos Maciços Rochosos	23
3.2.4.	Parâmetros Geológicos-Geotécnicos das Descontinuidades	26
3.3.	Taludes: Noção, Tipos de Rotura, Análise de Estabilidade	29
3.4.	Classificações Geomecânicas	35
3.4.1.	Considerações Iniciais	35
3.4.2.	Rock Mass Rating (RMR)	36
3.4.3.	Slope Mass Rating (SMR)	41
3.4.4.	Geological Strength Index (GSI)	44
3.5.	Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos e Nível de Perigosidade	52
3.5.1.	Considerações Iniciais	52
3.5.2.	Índice de Gravidade de Queda de Blocos (Pacheco, 2015)	52
3.5.3.	Rockfall Hazard Rating System (RHRSm2, versão 2015)	61
3.5.4.	Slope Quality Index (SQI, versão 2015)	65
3.6.	Modelação Geotécnica de Taludes: RocFall	70
4.	Estabilidade da Vertente Rochosa de S. Simão (Amarante): Geotecnia e Geomecânica	77
4.1.	Descrição Geral da Área de S. Simão (Amarante)	77
4.2.	Enquadramento Regional: Geográfico, Geológico e Geomorfológico	78
4.2.1.	Enquadramento Geográfico	78

4.2.2.	Enquadramento Geológico	80
4.2.3.	Enquadramento Geomorfológico	82
4.3.	Tectonossismicidade	84
4.4.	Hidroclimatologia	85
4.5.	Ocupação do Solo e Condicionantes de Ordenamento: Breve Síntese	88
4.6.	Caracterização da Vertente e Condições Geológicas e Geotécnicas	89
4.6.1.	Generalidades	89
4.6.2.	Estudos Geológico-Geotécnicos	91
4.6.3.	Zonamento Geotécnico	92
4.6.4.	Definição da Blocometria Geral dos Sectores I, III e IV	98
4.6.5.	Zonamento Geotécnico: Uma Proposta	100
4.7.	Classificações Geomecânicas e Análise de Estabilidade	101
4.7.1.	Geomecânica de Taludes Rochosos	101
4.7.2.	Parâmetros Geomecânicos Adotados	102
4.7.3.	Cartografia de Zonamento Geomecânico	103
4.7.4.	Análise de Estabilidade Geoestrutural	104
4.7.5.	Análise de Suscetibilidade e Nível de Perigosidade de Talude Rochosos	106
4.7.6.	Inspeção e Inventário de Blocos Instáveis	115
4.7.7.	Modelação Geotécnica de Quedas de Blocos (RocFall): Exemplo de Simulação de Quedas e Trajetórias	121
4.7.8.	Imagem Aérea da Vertente de S. Simão: Veículo Aéreo Não Tripulado (Drone)	123
4.7.9.	Modelação da Queda de Blocos	124
4.7.10.	Proposta de Solução Final: Breve Síntese	124
4.7.11.	Considerações Finais	126
5.	Conclusões	129
5.1.	Considerações Finais	129
5.2.	Perspetivas Futuras e Recomendações	132
6.	Referências Bibliográficas	137

Índice de Anexos

Anexo I - Ficha de inspeção geral da Vertente Rochosa de S. Simão.

Anexo II - Ficha de inspeção geral da Vertente Rochosa de S. Simão, por sector.

Anexo III - Ficha de inspeção por bloco rochoso (potencialmente instável).

Índice de Figuras

Figura 1. Fotografia do bloco que atingiu a habitação no Verão de 2004 (foto gentilmente cedida pela Câmara Municipal de Amarante; Pormenores em NEC & LABCARGA (2015)).	5
Figura 2. Abordagem metodológica integrativa para o estudo da vertente rochosa de S. Simão, Amarante.	8
Figura 3. Enquadramento cartográfico da área de Gouveia (S. Simão), Amarante.	12
Figura 4. Aspetos ilustrativos da aplicação da técnica de amostragem linear [a a d) cartografia de “scanlines” em S. Simão, Amarante].	14
Figura 5. Aspetos do voo com o VANT, na vertente rochosa de S. Simão: a) levantamento de pontos de controlo por GPS para georreferenciação das imagens; b e c) operações de preparação do VANT, antes do voo; d) VANT em operação.	16
Figura 6. Exemplo da utilização do GPS de alta precisão Trimble® GeoExplorer na georreferenciação de blocos instáveis; (a) e (b), na georreferenciação de pontos de controlo para o levantamento VANT; (c) e (d) para a fixação dos pontos de início dos painéis estudados durante os levantamentos geotécnico e geomecânico.	17
Figura 7. Representação esquemática de taludes (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).	29
Figura 8. Representação esquemática de uma rotura planar (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).	30
Figura 9. Representação esquemática de uma rotura em cunha (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).	31
Figura 10. Representação esquemática de uma rotura por tombamento (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).	32
Figura 11. Forças que atuam sobre uma superfície de rotura num talude (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).	34
Figura 12. Ábaco de Miller para o cálculo da resistência à compressão da rocha partindo dos dados obtidos do <i>Martelo de Schmidt</i> (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).	40
Figura 13. Métodos de suporte propostos para um determinado valor de SMR obtido (Romana, 1985, 1997).	44
Figura 14. Determinação do valor de GSI (adaptado de Hoek & Marinos, 2000; Marinos & Hoek, 2001).	47
Figura 15. Adaptação do ábaco de classificação do GSI para quantificação (adaptado de Hoek et al., 2013).	48
Figura 16. Ábaco para a determinação do $RQD_{teórico}$ através do espaçamento médio das descontinuidades (adaptado de Priest, 1993).	50
Figura 17. Ábaco de quantificação do valor de GSI (adaptado de Hoek et al., 2013; Santa et al., 2016).	51
Figura 18. Exemplo da ficha de inspeção (adaptado de NEC & LABCARGA, 2015).	54
Figura 19. Metodologia para obtenção do SQL (adaptado de Pinheiro et al., 2015).	65
Figura 20. Ilustração genérica do Rocfall 5.0 (RocScience – https://www.rocscience.com/).	71
Figura 21. Caracterização dos diferentes materiais de acordo com as características específicas: coeficiente de restituição (normal e tangencial), coeficiente de atrito dinâmico e coeficiente de resistência ao rolamento (RocScience – https://www.rocscience.com/).	72
Figura 22. Estampa ilustrativa da beleza ímpar de Amarante com o seu Mosteiro e ponte de São Gonçalo sobre o rio Tâmega (imagem do lado esquerdo: Vieira & Pinto, 2013; imagem do lado direito: http://www.lazer.publico.pt/monumentos/6453_convento-de-sao-goncalo-de-amarante).	77

Figura 23. Localização geográfica da área de Gouveia (S. Simão, Amarante).-----	78
Figura 24. Aspetos gerais da vertente rochosa de S. Simão: a e b – blocos instáveis; c e d – inclinação geral da vertente; e – vista panorâmica da vertente e as habitações no sopé da vertente. -----	79
Figura 25. Mapa de declives da área de Gouveia (S. Simão, Amarante).-----	80
Figura 26. Enquadramento geológico da área de Gouveia (S. Simão, Amarante), (adaptado e revisto de Teixeira et al., 1967).-----	81
Figura 27. Enquadramento geomorfológico da área de Gouveia (S. Simão, Amarante). -----	83
Figura 28. Sismicidade da área de S. Simão: A - zonas de intensidade máxima (escala internacional); B - Isossistas de intensidades máximas, escala de Mercalli Modificada de 1956; C – Sismos ocorridos na região, em Julho e Agosto de 2004 (IPMA).-----	85
Figura 29. Precipitação média mensal e precipitação mensal no ano de 2004, na estação de Amarante (SNIRH, 06I/01G).-----	87
Figura 30. Precipitação diária no mês de Agosto de 2004, na estação de Penafiel (SNIRH, 06H/01UG). -----	87
Figura 31. Carta de ocupação do solo da área de Gouveia (S. Simão, Amarante). -----	89
Figura 32. Sectores de estudo e perfis geológico-geotécnicos definidos para estudos de pormenor na vertente rochosa de S. Simão.-----	91
Figura 33. Aspetos gerais do Setor I.-----	92
Figura 34. Aspetos gerais do Setor III. -----	95
Figura 35. Aspetos gerais do Setor IV.-----	97
Figura 36. Geometria típica dos blocos rochosos nos setores I, III e IV.-----	99
Figura 37. Cartografia de zonamento geotécnico para a vertente de S. Simão. -----	100
Figura 38. Cartografia de zonamento geomecânico para a vertente de S. Simão. -----	103
Figura 39. Análise da estabilidade para a vertente de S. Simão: a - Setor I; b – Setor III; c – Setor IV; d - atitudes médias e variações angulares das três famílias de descontinuidades nos 3 setores. -----	105
Figura 40. Cartografia da suscetibilidade e grau de perigosidade para a vertente de S. Simão. -----	114
Figura 41. Representação do nível de gravidade dos blocos inspecionados na vertente de S. Simão (NEC & LABCARGA, 2015).-----	119
Figura 42. Representação da gravidade dos blocos inspecionados versus a suscetibilidade e grau de perigosidade na vertente de S. Simão. -----	120
Figura 43. Trajetórias obtidas através do modelo tridimensional (adaptado de Pacheco, 2015; NEC & LABCARGA, 2015).-----	122
Figura 44. Simulação da trajetória do bloco BL5. -----	124
Figura 45. Modelação do bloco rochoso BL2 com a barreira flexível instalada (adaptado de NEC & LABCARGA, 2015).-----	125
Figura 46. Exemplificação de um corte transversal esquemático da barreira flexível proposta para a vertente de S. Simão (adaptado de NEC & LABCARGA, 2015).-----	126

Índice de Quadros

Quadro 1. Determinação do tamanho dos blocos (ISRM, 1978; González de Vallejo & Ferrer, 2011). -----	24
Quadro 2. Classificação do tamanho dos blocos em função do J_v (adaptado de ISRM, 1978).-----	25
Quadro 3. Correlação entre o índice RQD e a qualidade do maciço rochoso (adaptado de Deere et al., 1967). -----	25
Quadro 4. Síntese dos parâmetros geológicos-geotécnicos das descontinuidades (ISRM, 1978, 1981, 2007, 2015). -----	27
Quadro 5. Classificação RMR – <i>Rock Mass Rating</i> (adaptado de Bieniawski, 1989). -----	38
Quadro 6. Análise da aplicação prática da classificação RMR por classes em contextos de escavação e sustento subterrâneo (adaptado Bieniawski, 1989).-----	41
Quadro 7. Classificação SMR – <i>Slope Mass Rating</i> (adaptado de Romana, 1985).-----	43
Quadro 8. Rotura planar provável de acordo com o SMR (Romana, 1985, 1997).-----	43
Quadro 9. Rotura em cunha provável de acordo com o SMR (Romana, 1985, 1997).-----	43
Quadro 10. Rotura por tombamento provável de acordo com o SMR (Romana, 1985, 1997).-----	43
Quadro 11. Rotura em massa provável de acordo com o SMR (Romana, 1985, 1997).-----	43
Quadro 12. Valores estimados do m_i (adaptado de Hoek, 2007). -----	45
Quadro 13. Classificação das características das descontinuidades (adaptado de Bieniawski, 1989).-----	49
Quadro 14. Descrição e respetivos pesos atribuídos às condições das descontinuidades na classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989). -----	49
Quadro 15. Caracterização da anomalia para obtenção do nível de gravidade (segundo Pacheco, 2015; NEC & LABCARGA, 2015). -----	59
Quadro 16. Fator de agravamento em função no número de anomalias (Pacheco, 2015; NEC & LABCARGA, 2015). -----	59
Quadro 17. Intervalos de gravidade e respetivo valor de NGA (Pacheco, 2015; NEC & LABCARGA, 2015). --	60
Quadro 18. Parâmetros a serem avaliados para a determinação do NGB (Pacheco, 2015; NEC & LABCARGA, 2015). -----	60
Quadro 19. Níveis de gravidade de acordo com o NGB (Pacheco, 2015; NEC & LABCARGA, 2015). -----	61
Quadro 20. Identificação dos fatores e parâmetros em avaliação na proposta do índice de qualidade (adaptado de Pinheiro et al., 2015).-----	61
Quadro 21. Sistema de classificação RHRSm2 (adaptado de Pinheiro et al., 2015).-----	64
Quadro 22. Resumo da classificação do sistema RHRSm2 e respetiva conversão para o índice geral do talude (adaptado de Pierson et al., 1990; Budetta, 2004).-----	64
Quadro 23. Classificação quantitativa e qualitativa do talude bem como o seu grau de risco associado função do valor de SQI (Pinheiro et al., 2015). -----	65
Quadro 24. Peso associado a cada fator para o cálculo do SQI (adaptado de Pinheiro et al.,2015)-----	66
Quadro 25. Atribuição de fatores para a determinação do SQI (adaptado de Pinheiro et al, 2015).-----	68
Quadro 26. Classes de ocupação do solo na área de S. Simão e região envolvente (cf. figura 31).-----	88
Quadro 27. Quadro-síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (segundo a ISRM, 1978, 1981) do maciço do Setor I. -----	94

Quadro 28. Quadro-síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (segundo a ISRM, 1978, 1981, 2007) do maciço do Setor III. -----	96
Quadro 29. Quadro-síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (segundo a ISRM, 1978, 1981, 2007) do maciço do Sector IV. -----	98
Quadro 30. Síntese das características dos setores I, III e IV da vertente de S. Simão, de acordo com as classificações geomecânicas RMR, SMR e GSI. -----	101
Quadro 31. Resumo dos parâmetros geomecânicos estimados para a vertente de S. Simão. -----	102
Quadro 32. Valores de coesão (c), ângulo de atrito (ϕ) e parâmetro da rocha intacta (m_i) para o maciço da vertente de S. Simão. -----	102
Quadro 33. Aplicação da classificação RHRSm2 à zona geomecânica ZGM0a (Setor V).-----	107
Quadro 34. Aplicação da classificação RHRSm2 à zona geomecânica ZGM0b (Setor II).-----	107
Quadro 35. Aplicação da classificação RHRSm2 à zona geomecânica ZGM1 (Setores I e IV). -----	108
Quadro 36. Aplicação da classificação RHRSm2 à zona geomecânica ZGM2 (Setor III).-----	108
Quadro 37. Aplicação do índice SQI à zona geomecânica ZGM1 (Setores I e IV).-----	111
Quadro 38. Aplicação do índice SQI à zona geomecânica ZGM2 (Setor III).-----	112
Quadro 39. Síntese das características das zonas geomecânicas ZGM0, ZGM1 e ZGM2 da vertente de S. Simão, de acordo com as classificações RHRSm2 e SQI. -----	113
Quadro 40. Caracterização da anomalia. -----	115
Quadro 41. Caracterização da anomalia e obtenção do nível de gravidade. -----	116
Quadro 42. Nível de gravidade final das anomalias. -----	116
Quadro 43. Hierarquização segundo o nível de gravidade (NEC & LABCARGA, 2015).-----	117
Quadro 44. Avaliação do sector mais problemático.-----	118
Quadro 45. Hierarquização dos blocos por nível de gravidade.-----	118
Quadro 46. Características dos três tipos de terrenos atravessados.-----	123

1

Introdução Geral

(Página propositadamente em branco)

1. Introdução Geral

1.1. Âmbito e Enquadramento do Tema

A exposição deste trabalho enquadra-se na unidade curricular de “Dissertação/Projeto/Estágio”, do 2º ano, do curso de mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente (MEGG) do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Politécnico do Porto.

Esta tese enquadra-se no formato Projeto, visto assentar num caso de estudo prático de engenharia, mais concretamente em geotecnia de taludes rochosos. De facto, está inserido numa real necessidade que a Câmara Municipal de Amarante (CMA) sentiu após acidente que resultou na queda de um bloco de dimensões consideráveis ao longo de uma vertente rochosa no lugar do Casal, freguesia de São Simão, distrito de Amarante. Esta ocorrência já se tinha verificado há algum tempo, com a queda de um bloco ao longo da vertente, que possivelmente deixou de ser estável, e por esse facto rolou ao longo da mesma até atingir uma garagem de habitação que está localizada no sopé dessa mesma vertente. Apenas recentemente surgiu a oportunidade de analisar profundamente este caso por forma a obter-se um estudo técnico-científico de base, bem fundamentado e sustentado em termos de engenharia e com a preconização da melhor solução em termos de proteção.

Foram realizados anteriormente alguns estudos preliminares no local, mas aparentemente nunca foi dado à estampa relatório com a caracterização da situação e proposta de solução de estabilização e proteção e, por isso, não satisfazendo os responsáveis deste município. Surgiu recentemente a oportunidade por solicitação da CMA, juntamente com o Núcleo de Estudos da Construção (NEC|ISEP) e o Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA|ISEP), a realização de trabalho mais aprofundado por forma a obter-se um relatório final onde se pudesse determinar qual o real perigo das vertentes naturais e em que medida se poderia realizar uma contenção do maciço rochoso.

Numa fase inicial foram realizadas visitas ao local e área envolvente com o objetivo geral de se efetuar um aturado reconhecimento do terreno, inspeção visual das condições geológico-geotécnicas e assim proceder-se à estratégia a seguir no estudo prévio e o delinear da metodologia

global de trabalho para culminar com a proposta da solução de intervenção em termos de proteção. Assim, foi possível definir três potenciais zonas de diferentes perigosidades e uma outra cuja configuração do terreno levava a crer que todos os possíveis blocos que se desprendessem entrariam em rolamento ao longo desse mesmo local (a denominada bacia de receção). Tendo por base estas visitas delineou-se o tipo de intervenção geral, a aplicação do método da técnica da amostragem linear (“scanline sampling technique”) para estudos de compartimentação de maciços rochosos, a avaliação expedita da resistência do maciço rochoso através de ensaios geomecânicos com o martelo de Schmidt tipo L (ensaio esclerométrico), a análise estatística das características geológico-geotécnicas do maciço, que em conjunto permitiram a proposta da cartografia do zonamento geotécnico e, bem assim, a aplicação de classificações geomecânicas ligadas a taludes que permitiram definir uma cartografia de zonamento geomecânico. Por fim, para além dos estudos geotécnicos de campo e laboratório foram realizados estudos de modelação geotécnica que sustentaram o projeto e o dimensionamento da solução de proteção (pormenores em Pacheco, 2015). O aprofundamento de todo este trabalho de campo e de gabinete resultou na realização do relatório técnico (NEC & LABCARGA, 2015) com um resultado final que permitirá uma intervenção por parte deste município a fim de proteger a população local de um novo acidente. O signatário da presente tese colaborou no referido relatório, especialmente nas fases de campo e de análise de dados geológico-geotécnicos, bem como participou na redação e discussão global do relatório.

A problemática de vertentes e taludes naturais com grau de instabilidade é uma situação comum no nosso país, principalmente na região centro e norte do território, mais especificamente nas áreas montanhosas e mesmo em áreas urbanas e rurais (e.g., Bateira & Soares, 1997; Bateira et al., 2008, 2014; Chaminé et al., 2010a,b; Pereira et al., 2012; Santos et al., 2014; Zêzere et al., 2014, 2015; Vaz & Zêzere, 2016). Tal situação é devida ao facto de existirem nestas zonas locais com relevos vigorosos. São muitos os locais onde, para além de declives acentuados, se verificam blocos individualizados e que, no plano meramente visual, dá a entender que os mesmos irão entrar em queda à mínima instabilidade criada no referido talude. Felizmente, a problemática da instabilidade de blocos em vertentes rochosos e/ou taludes naturais, tem-se tornado uma preocupação crescente e já são visíveis alguns exemplos de estudos científicos e boas práticas de intervenções para contenção desses blocos rochosos. Por outro lado, muitas das vezes, essas intervenções só acontecem em locais onde há mais circulação de pessoas, como em estradas de acesso principal, zonas turísticas, etc. Em locais onde não se vislumbra tanta circulação de pessoas, não lhes é dada tanta relevância, fazendo com que o processo de estudo e intervenção seja demasiado moroso, ou até mesmo, inexistente.

Nesta tese será apresentado um exemplo muito interessante, num local com reduzido movimento populacional mas com alguns núcleos de habitações nas proximidades, em que o nível de perigosidade de alguns blocos rochosos é relevante. A instabilidade no terreno criada, por exemplo, por atividade sísmica significativa, ou por condições climatéricas severas e extremas (e.g., intensos e bruscos períodos de precipitação e amplitudes térmicas significativas), ou até mesmo por incêndios, poderá despoletar a instabilidade de blocos rochosos contribuindo para a ocorrência de potenciais acidentes junto, por exemplo, de núcleos urbanos rurais ou periurbanos.

1.2. Enquadramento Histórico: Breve Descrição do Acidente

No ano de 2004, entre o final do mês de Julho e o início do mês de Agosto, ocorreu o desprendimento de um bloco rochoso¹. Com efeito, não foi possível precisar com exatidão a altura e o dia, em que um dos blocos rochosos existentes na vertente do lugar do Casal, freguesia de São Simão, se destacou do maciço e deslizou ao longo da vertente até atingir a garagem de uma das habitações (figura 1) e, bem assim, alarmando naturalmente quem habitava naquele lugar, bem como os responsáveis do Município de Amarante. Felizmente, não existe registo de consequências graves em termos de perdas de vida ou ferimentos na população.



Figura 1. Fotografia do bloco que atingiu a habitação no Verão de 2004 (foto gentilmente cedida pela Câmara Municipal de Amarante; Pormenores em NEC & LABCARGA (2015).

¹ Segundo testemunhos locais (especialmente da Sra. Maria Madalena Pereira Monteiro e da Sra. Maria Pereira) a queda do bloco deverá ter ocorrido em finais de Julho de 2004 ou início de Agosto de 2004. São devidos agradecimentos à Sra. D. Maria Pereira pelo apoio de campo nas diversas subidas, em 2015, às escarpas de S. Simão, por todas as informações partilhadas e, sobretudo, pelo afável acolhimento e cooperação com toda a equipa do ISEP. São extensivos os nossos agradecimentos a todos os residentes no sopé da vertente de S. Simão e aos técnicos da Câmara Municipal de Amarante.

Através da análise de alguns dados, tais como, de sismicidade e precipitação, para esse ano e naquele período, aproximadamente, verificou-se a existência de três sismos de pequena magnitude, bem como uma precipitação acima do normal no mês de Agosto, mais precisamente 5 vezes mais que o expectável para esse período. Com a verificação destes dados foi possível ter uma ideia do que poderá ter ocorrido naquela data para que tal acidente ocorresse, o que não inviabiliza a ideia de que o local continua sendo de algum risco, pelo que este estudo irá apresentar todos os indícios necessários para que se perceba a importância de uma intervenção no Lugar do Casal, Freguesia de São Simão.

Após 11 anos de alguma insistência da população e também alguma preocupação dos novos responsáveis do Município de Amarante, foi feito um acordo com o Instituto Superior de Engenharia do Porto que, através do NEC e LABCARGA (centros de prestação de serviços do ISEP dos Departamento de Engenharia Civil e Departamento de Engenharia Geotécnica, respetivamente), iniciaram um estudo exaustivo daquele local ao nível da perigosidade geotécnica e solução de contenção de blocos, o qual culminou num relatório que serviu, em parte, de caso de estudo deste projeto de mestrado.

1.3. Objetivos

De entre vários objetivos serão de destacar principalmente os seguintes:

- Reconhecimento geomorfológico, geológico e hidrológico do talude, inspeção visual e cartografia geral dos maciços que o constituem, bem como dos blocos rochosos destacados do maciço. Delinear um modelo geológico, morfotectónico e hidrogeomorfológico da área, bem como esboçar uma solução de contenção para o potencial rolamento de blocos;
- Caracterização geológico-geotécnica de taludes rochosos aplicando a técnica da amostragem linear (*scanline sampling technique*) em todas as descontinuidades expostas do maciço a fim de avaliar o grau de compartimentação e caracterização geotécnica-geomecânica através da aplicação da *Basic Geotechnical Description of Rock Masses* (BGD), proposta pela *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1981) e outras recomendações propostas pela ISRM (1978, 2007, 2015), pela *Geological Society Engineering Group Working Party Report* (GSE, 1995), pela *Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow* (CFCFF, 1996) e pela *International Association of Engineering Geology* (IAEG, 1981a,b);
- Realização de ensaios geomecânicos *in situ* (Esclerómetro portátil ou “*Martelo de Schmidt – tipo L*”) para obter um valor médio de resistência do material rochoso presente no talude;

-
- Proposta de um zonamento geotécnico baseado em todos os dados obtidos para o talude de São Simão, baseado igualmente na inspeção visual do local;
 - Aplicação das classificações geomecânicas, RMR – *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1976, 1984, 1989), SMR – *Slope Mass Rating* (Romana, 1985, 1993, 1997) e GSI – *Geological Strength Index* (Hoek, 2007; Hoek et al., 2013) cuja finalidade é a caracterização da qualidade geotécnica e geomecânica dos taludes rochosos;
 - Aplicação de classificações de maciços rochosos a nível da perigosidade, RHRSm2 – *Rockfall Hazard Rating System* (versão 2015) e SGI – *Slope Quality Index* (versão 2015), bem como a proposta de uma cartografia de suscetibilidade e perigosidade baseada nos zonamentos geotécnico e geomecânico;
 - Modelação geotécnica básica de queda de blocos e trajetórias com a aplicação prática do programa informático *RocFall* da *RocScience*.

1.4. Organização

Neste tópico referente à organização, é pretendido que se explicita em forma de síntese os diferentes capítulos que serão desenvolvidos ao longo desta dissertação, fazendo uma junção das ideias mais importantes a serem retidas.

Capítulo 1 – ao longo deste capítulo, do qual este tópico faz parte, serão apresentadas as ideias principais referentes a esta dissertação, seja de carácter introdutório geral, com a apresentação dos objetivos, organização, etc., seja de apresentação mais específica do tema que será desenvolvido na problemática da perigosidade da queda de blocos em taludes naturais;

Capítulo 2 – este capítulo será aquele onde se apresentarão as diferentes técnicas usadas no trabalho de campo e que se tornam fundamentais para o sucesso do resultado final. Apresentam-se também as implicações de cada metodologia e técnica;

Capítulo 3 – este é um dos capítulos mais importantes onde se apresentarão as generalidades referentes aos taludes rochosos e às técnicas de classificação dos mesmos. Essas classificações serão aplicadas no capítulo 4 para a caracterização do talude rochoso em função da sua qualidade e perigosidade;

Capítulo 4 – este é o capítulo com o maior desenvolvimento uma vez que será ao longo deste que se apresentará o caso de estudo do talude de São Simão, Amarante. Neste capítulo será possível verificar a estrutura de um relatório indicado para a problemática apresentada, ou seja, a apresentação do carácter mais geral do local, a definição de

um zonamento, a aplicação das classificações, a análise da estabilidade e a respetiva perigosidade. Na parte final apresenta-se a proposta de uma solução final baseada em todo o trabalho anteriormente apresentado;

Capítulo 5 – neste capítulo serão apresentadas as considerações finais referentes a este caso de estudo prático, resumem-se algumas ideias principais e salientam-se as principais conclusões obtidas com a elaboração deste trabalho.

Na figura 2, apresenta-se uma síntese da abordagem metodológica adotada para o desenvolvimento do estudo, de acordo com os objetivos enunciados.

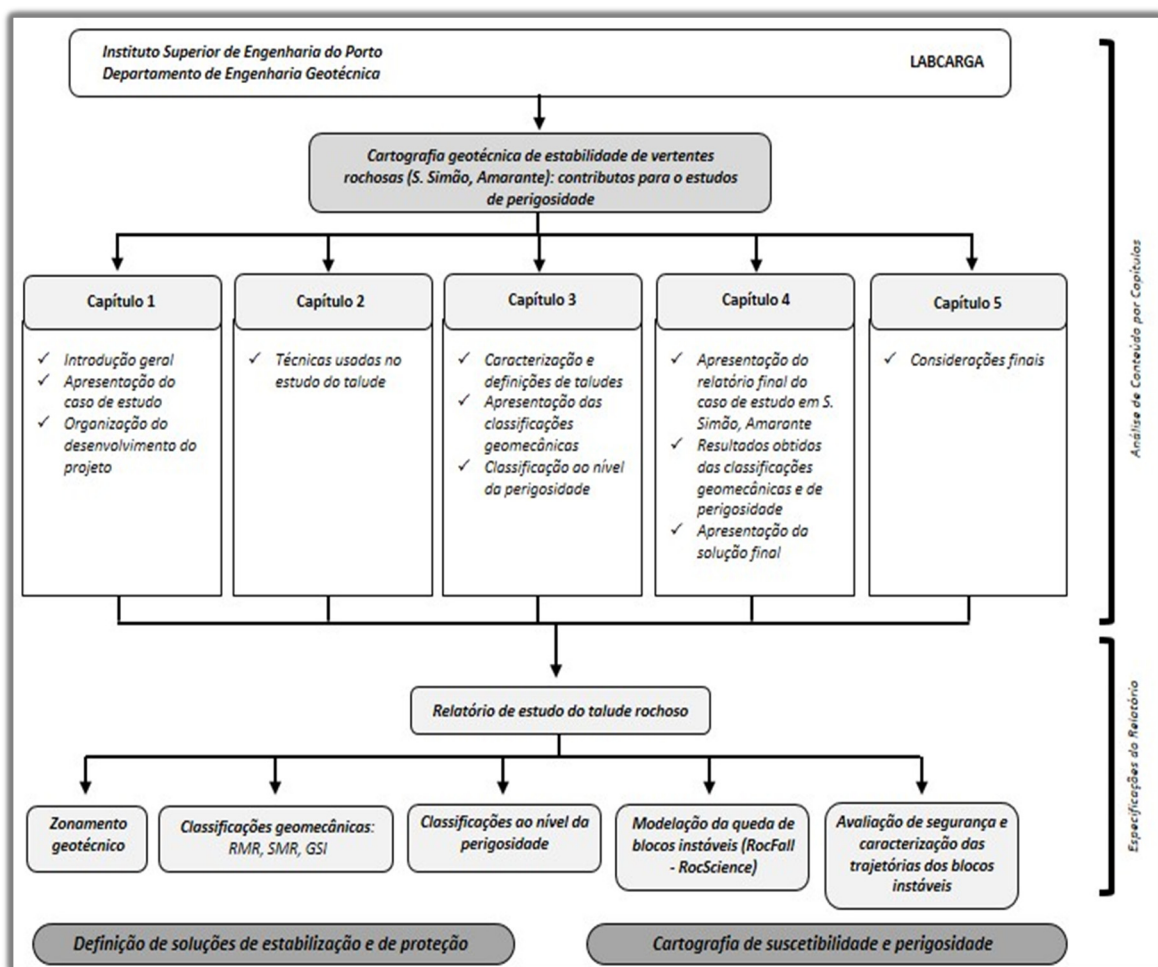


Figura 2. Abordagem metodológica integrativa para o estudo da vertente rochosa de S. Simão, Amarante.

2

Metodologias e Técnicas

(Página propositadamente em branco)

2. Metodologias e Técnicas

Os levantamentos de campo, conducentes à inspeção e avaliação da segurança da vertente rochosa de S. Simão e da sua envolvente foram conduzidos pela equipa do ISEP (Instituto Superior de Engenharia do Porto) durante os meses de Abril a Setembro de 2015, com algumas visitas pontuais para estudos complementares em Novembro de 2015.

Para atingir o objetivo fundamental anteriormente referido, desenvolveram-se atividades complementares, de gabinete e de campo, a saber:

Documentos cartográficos e outros elementos bibliográficos:

Relativamente à cartografia, recorreu-se aos seguintes documentos (figura 3):

- i) Carta topográfica da “Carta Militar de Portugal”, à escala 1/25.000, Série M888: folha 113 (Amarante), IGeoE (1997);
- ii) Ortofotomapas da área de Gouveia – S. Simão (Amarante), à escala 1/5.000 e imagens aéreas de alta-resolução “Bing Maps” e “Google Earth Pro”;
- iii) Cartas geológicas, geomorfológicas e tectónicas gerais a escalas várias: 1/50.000); [*Carta Geológica de Portugal, folha 10-C (Peso da Régua)*, de Teixeira et al. (1967)]; 1/200.000 [Carta Geológica de Portugal, de Pereira et al. (1989)]; 1/500.000 [*Carta Geológica de Portugal, 5ª edição*, de Oliveira et al. (1992); *Carte Géomorphologique du Portugal*, de Brum Ferreira (1981), *Mapa de Fracturas*, de Conde (1983)]; 1/1000.000 [Carta Tectónica de Portugal de Ribeiro et al. (1972) e Carta Neotectónica de Portugal de Cabral & Ribeiro (1988, 1989)];
- iv) Cartografia fornecida pela Câmara Municipal de Amarante, à escala 1/10.000, nomeadamente: altimetria, planimetria, hidrografia, entre outras.

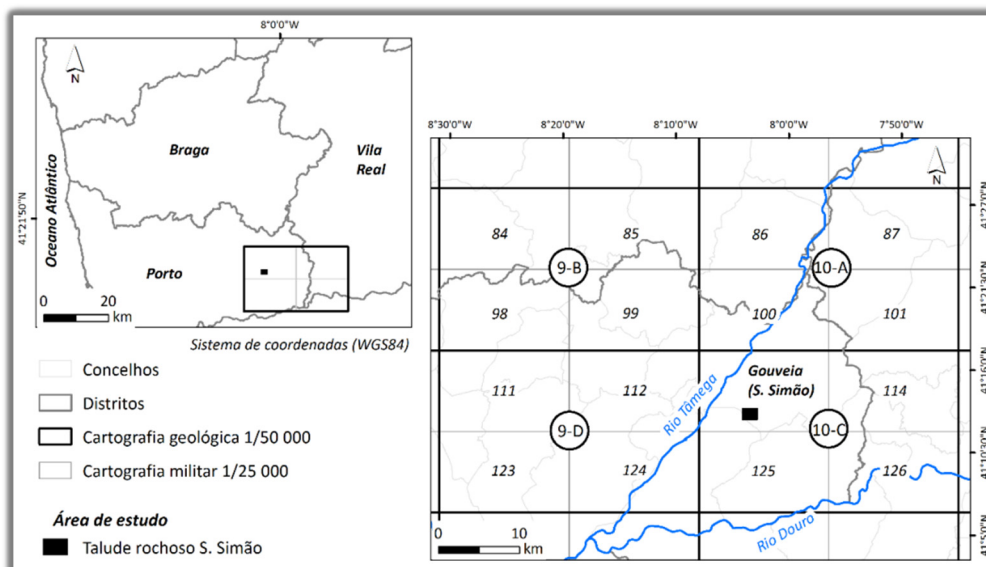


Figura 3. Enquadramento cartográfico da área de Gouveia (S. Simão), Amarante.

Técnica da Amostragem Linear em Geotecnia de Maciços Rochosos

A técnica de amostragem linear aplica-se no estudo das discontinuidades existentes em superfícies expostas dos maciços rochosos, através de uma cartografia por domínios ou áreas representativas do maciço rochoso, estando amplamente descrita, entre outros, por Priest (1993), Chaminé & Gaspar (1995), Dinis da Gama (1995), Chaminé et al. (2010a,b, 2013, 2015), Watkins et al. (2015).

Com o recurso a esta técnica, recolhem-se dados de forma expedita, ao longo de linhas de amostragem representativas, designadas como “scanlines”, que permitem, por extrapolação, definir o grau de alteração, o grau de compartimentação e o grau de resistência do maciço de uma dada área em estudo. A sua aplicação minimiza muitos erros patentes em estudos de fraturação de maciços rochosos, seja pela falta de representatividade ou aleatoriedade da sua amostragem (e.g., Terzaghi, 1965; Priest, 1993; Chaminé et al., 2015; Watkins et al., 2015).

A técnica de amostragem linear (figura 4) consiste, basicamente, na colocação de uma fita graduada (em metros) nos taludes/afloramentos rochosos (tomam a designação de painéis) a serem cartografados, aproximadamente a 1.20 – 1.50 m do solo (e.g., Dinis da Gama, 1995; Chaminé & Gaspar, 1995; Chaminé et al., 2015). Para cada talude (ou painel) cartografado, depois de colocada a fita graduada a partir do ponto de origem de cada linha de amostragem, são cartografadas de forma sistemática todas as superfícies expostas do maciço e registado, através de uma cartografia de painéis, as características (especialmente geológicas, geotécnicas, geomecânicas) de todas as discontinuidades intersectadas pela fita graduada. Cada ponto de amostragem (denominado por estação geotécnica) é descrito e registado em fichas de levantamento baseadas na proposta da

ISRM (1981), relativa à descrição geotécnica de maciços rochosos com a denominação de “*Basic Geotechnical Description of Rock Masses*” (BGD). Todavia, há novos desenvolvimentos na aplicação desta técnica, recorrendo-se à aplicação de sistemas de informação geográfica e técnicas avançadas de geo-posicionamento global de alta precisão (Reid & Harrison, 2000).

Para cada descontinuidade que intersecta a linha de amostragem registam-se os seguintes parâmetros (ISRM, 1978, 1981):

- **D:** distância à origem da fita graduada;
- **L:** semi-comprimento exposto, ou seja, o comprimento visível da intersecção da descontinuidade com a face de rocha, apenas para um dos lados da fita graduada;
- **T:** tipo de terminação que apresenta a extremidade da descontinuidade (R: na rocha; D: noutra descontinuidade; O: obscura); Atitude da descontinuidade (direção/inclinação) medida junto ao ponto de intersecção da linha de amostragem com a descontinuidade;
- **C:** curvatura, numa escala de C1 a C5, em que C1 representa superfícies planas e C5 superfícies muito curvas;
- **R:** rugosidade, numa escala de R1 a R5, significando R1 uma superfície lisa e R5 uma superfície muito rugosa. Além destes parâmetros são registados, sempre que se considera relevante, outras características das descontinuidades, tais como abertura, tipo de preenchimento, presença de água ou outras observações complementares.

Todos os dados respeitantes a cada linha de amostragem são devidamente registados numa ficha de levantamento de descontinuidades na qual constam, além dos parâmetros já mencionados, os seguintes: número da linha de amostragem; localização da linha de amostragem; atitude da linha de amostragem; orientação do talude (ou hasteal, no caso de a aplicação desta metodologia a túneis) estudado; litologia; grau de alteração; data do levantamento; rubrica do responsável pelo levantamento. Para a síntese e tratamento dos inúmeros dados cartografados no terreno foram usadas a calculadora dos parâmetros básicos geológico-geotécnicos, “GeoTech|CalcTools: ScanGeoData|BGD & SchmidtData|UCS” (Fonseca et al., 2010; Chaminé et al., 2013), e a calculadora geomecânica MGC–RocDesign|CALC (Pinheiro et al., 2014). Estas permitem efetuar um cruzamento exaustivo de toda a informação e a interpretação de todos os geo-dados, de modo a apoiar o estabelecimento da compartimentação dos maciços rochosos, de cartografia de zonamento geotécnico, da avaliação geomecânica e de modelos geotécnicos conceptuais.



Figura 4. Aspectos ilustrativos da aplicação da técnica de amostragem linear [a) a d) cartografia de “scanlines” em S. Simão, Amarante].

Ensaios Geomecânicos in situ: Esclerómetro Portátil

O ensaio *in situ* realiza-se com recurso ao esclerómetro portátil (martelo de Schmidt, tipo L). O martelo de Schmidt permite avaliar a dureza do material-rocha através do ressalto (“Rebound”, R) de uma massa de aço, que quando encostada sobre a superfície da rocha, sofre maior ou menor ressalto mediante a dureza que a rocha possa apresentar. Esse valor fica registado no próprio equipamento, variando numa escala de 10 a 100 (graduado de 2 em 2 valores) numa escala adimensional.

O esclerómetro portátil deverá ser colocado de forma perpendicular à superfície rochosa a ensaiar. Essa superfície deve ser, na medida do possível, limpa, sem resíduos ou películas que possam falsear os resultados dos ensaios. Outra das verificações e cuidados a ter na utilização do martelo é a sua posição em relação ao maciço, devendo para tal ser registado na folha de levantamento de campo o referido posicionamento de entre as várias posições possíveis (esse posicionamento torna-se fulcral na posterior conversão das unidades de resistência do maciço para MPa, através do ábaco de Miller).

A ISRM (1981) recomenda que em estudos práticos de geologia de engenharia ou de mecânica das rochas sejam executadas 10 medições em cada superfície ensaiada, sendo a média dos 5 valores mais elevados como valores representativos. Com a obtenção do valor médio das medições,

conhecida a densidade do material rocha e a orientação do martelo em relação à superfície ensaiada, recorre-se ao já referido ábaco de Miller. Seguidamente, obtém-se o valor da resistência à compressão uniaxial, σ_c , do material ensaiado. As classes de resistência de compressão, segundo a ISRM (1981), são sistematizadas em 5 termos de resistência.

Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT):

Os veículos aéreos não-tripulados (VANTs), ou UAV (“Unmanned Aerial Vehicle”) ou ainda, comumente chamados de “drones” (ou “micro-drones”), surgiram inicialmente para fins militares com o objetivo de executar missões aéreas que poderiam oferecer risco aos militares (Austin, 2010). Com o desenvolvimento desta tecnologia o seu uso passou a ser mais transversal a outras áreas desde lazer, uso militar e para vigilância, para missões de salvamento, investigação científica, entre outras, já que os VANT tornaram-se mais baratos do que veículos aéreos padrão e permitem ser pilotados remotamente.

A monitorização com VANT baseia-se na utilização de uma plataforma com capacidade para transportar variados equipamentos para registo de dados como câmaras e sensores. Estes permitem a recolha de dados a um público cada vez mais diversificado, de forma rápida, económica e segura (Fahlstrom & Gleason, 2012; Valayanis & Vachtsevanos, 2015). Os VANT possibilitam, também, o tratamento da informação recolhida pelos mesmos em tempo real ou pós-processamento. Os dados recolhidos podem ser analisados com diversas aplicações que os tratam de acordo com os objetivos, como, modelação 3D, modelos de elevação, fotogrametria, índices de vegetação, cartografia geológica, etc. (e.g., Fahlstrom & Gleason, 2012; Jordan, 2015; Valayanis & Vachtsevanos, 2015). Através da obtenção de um conjunto de fotografias, com sobreposição lateral e longitudinal muito parecida à que se obtém com um avião, é possível com um VANT obter um mosaico de fotografias georreferenciadas com uma resolução espacial inferior a 5 cm, algo difícil de se obter com outro método. Além da informação geográfica, permite criar modelos 3D de qualquer objeto com um nível de detalhe muito elevado (Fahlstrom & Gleason, 2012; Valayanis & Vachtsevanos, 2015).

Atualmente, a utilização de VANT para estudos muito localizados, como é o caso do estudo da área da vertente de S. Simão, revela-se como uma técnica fundamental pela obtenção de informação geográfica de elevada resolução a um custo de aquisição relativamente baixo (comparado a outras tecnologias) e pela rapidez na obtenção de dados e seu processamento.

Os dados recolhidos através de um VANT são posteriormente tratados e processados através de *software* de fotogrametria (e.g., *OpenDroneMap*). Este tipo de programa gera ortofotomapas

georreferenciados de alta resolução, bem como o referido modelo 3D. Para a aquisição de imagens na área de estudo recorreu-se ao VANT do tipo *Hexacopter*, cedido pela SKYCAM – AERO FOOTAGE LDA, através do Engenheiro Jorge Sousa, que o pilotou remotamente (NEC & LABCARGA, 2015). Este veículo está equipado com uma câmara fotográfica convencional de alta resolução Canon EOS 70D (20,2 megapixéis), cujo programa permite realizar automaticamente disparos num período de tempo escolhido pelo utilizador.

O VANT é controlado de duas formas; uma através do programa *Mission Planner*, onde são inseridos os parâmetros de voo necessários e onde é definida a área a sobrevoar pelo VANT; outra através de um comando, utilizado para fazer as aterragens e descolagens do veículo. No caso do voo realizado na vertente de S. Simão (figura 5) foram obtidas fotografias com um intervalo de 2 segundos, e uma sobreposição superior a 60%. O voo foi efetuado a uma altitude de 100 m relativamente ao solo, o que permite resoluções na ordem dos 2 cm/pixel. No entanto, utilizou-se na exportação final do modelo uma resolução de 5 cm/ pixel, para facilitar as operações subsequentes, sem perda substancial de informação.



Figura 5. Aspectos do voo com o VANT, na vertente rochosa de S. Simão: a) levantamento de pontos de controlo por GPS para georreferenciação das imagens; b e c) operações de preparação do VANT, antes do voo; d) VANT em operação.

Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

No que diz respeito aos SIG, foram aplicadas diversas ferramentas recorrendo ao programa da ESRI® ArcGIS 9.3, para a digitalização, a georreferenciação e a vectorização de toda a documentação cartográfica, bem como para o tratamento, a integração e a síntese de toda a informação. Além disso, como complemento a este programa, recorreu-se ainda ao programa OCAD® for Cartography (versão 11).

O sistema de coordenadas utilizado em toda a cartografia produzida foi o Hayford-Gauss Datum73, ao qual correspondem todos os valores representados nas grelhas de coordenadas presentes nos mapas apresentados. Apesar de este sistema se considerar obsoleto, e seja recomendável a sua substituição por sistemas mais recentes (nomeadamente o sistema ETRS89/ PT-TM06), optou-se pela sua utilização para minimizar os erros de conversão relativamente à cartografia cedida pela Câmara Municipal de Amarante.

Nesta fase, georreferenciaram-se ainda blocos instáveis, que ocorrem ao longo da vertente, tendo-se recorrido para tal aos equipamentos GPS de alta precisão, GPS Trimble GeoExplorer GeoXH2005 e GeoXH2008 (figura 6)



Figura 6. Exemplo da utilização do GPS de alta precisão Trimble® GeoExplorer na georreferenciação de blocos instáveis; (a) e (b), na georreferenciação de pontos de controlo para o levantamento VANT; (c) e (d) para a fixação dos pontos de início dos painéis estudados durante os levantamentos geotécnico e geomecânico.

(Página propositadamente em branco)

3

Geotecnia e Geomecânica de Taludes Rochosos

(Página propositadamente em branco)

3. Geotecnia e Geomecânica de Taludes Rochosos

3.1. Generalidades

Nem sempre os domínios de estudo da mecânica das rochas obtiveram a notoriedade e a importância dos dias de hoje; foi apenas em meados do século XX que se começaram a debruçar mais especificamente sobre este assunto (Rocha, 2013). Numa fase inicial, os trabalhos científicos centraram-se mais especificamente no estudo das rochas brandas, não consolidadas, nos solos, o que nos permite aferir que a designada Mecânica dos Solos, adquiriu inicialmente um estatuto diferenciado da Mecânica das Rochas (Terzaghi & Peck, 1987).

A Mecânica das Rochas, com a designação especificada para esta área de estudo, apenas surgiu por volta do ano de 1955 (Simões Cortez, 2004; Rocha, 2013), tendo começado a surgir as primeiras obras cujos conteúdos seriam posteriormente compilados a fim de reunir todos os conhecimentos já obtidos em relação à Mecânica das Rochas. Em Portugal, o autor de destaque em relação a esta área seria Mello Mendes (1967/68) que propõe o termo *Geomecânica* como sendo a designação mais abrangente para a mecânica das rochas. A Geomecânica ocupa-se do estudo do comportamento reológico dos materiais geológicos considerados como rocha, sendo a generalização desse estudo os problemas que se apresentam ao Engenheiro e ao Geólogo.

O termo Geomecânica proposto por Mello Mendes (1967/68), comporta em si uma ampla aplicação em termos do projeto, da conceção e da execução de todo tipo de trabalhos em que é necessário ter em conta o comportamento do maciço rochoso, seja em qualquer tipo de intervenção da engenharia, fundações, taludes, túneis, etc. A Mecânica das Rochas não se distingue pela sua singularidade, mas sim pelo seu amplo campo de abrangência, nomeadamente, em disciplinas como a geologia estrutural, a geologia aplicada, a mecânica dos solos, a mecânica dos sólidos e os métodos computacionais que trouxeram uma maior versatilidade, quer individualmente em cada uma destas disciplinas, quer na possibilidade de agrupar conhecimentos de todas elas para obter uma só resposta ao problema apresentado.

Dada a interpenetração dos limites que definem a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas existem autores que consideram a Geomecânica como uma área científica que reúne ambas as mecânicas numa só (Bock, 2006).

Como forma de introduzir especificamente o comportamento dos maciços rochosos pode afirmar-se que os mesmos estão sujeitos a diversas solicitações que afetam a sua estabilidade, podendo essas solicitações ser completamente externas às suas características (chuva, neve, fogo, sismos, etc.) ou em sentido contrário o maciço rochoso já ter características intrínsecas que lhe conferem instabilidade (número de descontinuidades, estado de alteração, fracturação, etc.). O estudo referente à estabilidade ou instabilidade de um maciço rochoso é uma tarefa bastante complexa que envolve vários tipos de intervenção, sendo o trabalho de campo a base de todo o estudo e por isso mesmo, a principal atividade que definirá tudo o resto. A análise posterior é feita através dos dados obtidos no trabalho de campo e com recurso às classificações geomecânicas, sendo possível determinar as condições do maciço e caracterizá-lo em função dos resultados obtidos.

Para a correta aplicação das classificações geomecânicas é fundamental conhecer as características e propriedades geológico-geotécnicas do maciço rochoso, sendo para isso fundamental a recolha de informação geológica de base (especialmente ligada à litologia e geologia estrutural), bem como das condições hidrogeológicas e geomorfológicas da área em estudo e do maciço rochoso em específico. Posteriormente é realizada uma compartimentação do maciço através das características geométricas e mecânicas de todas as descontinuidades identificadas no trabalho de campo.

Nesta fase mais genérica o estudo termina com a determinação e delimitação do zonamento geotécnico e convenientemente do modelo conceptual geotécnico do maciço rochoso (Rocha, 2013). É ainda de referir que a determinação das características geomecânicas do maciço surge como uma das prioridades em qualquer projeto de engenharia que envolva maciços rochosos (Dinis da Gama, 1991).

3.2. *Compartimentação de Maciços Rochosos*

3.2.1. *Reconhecimento Geológico*

Para que se possa realizar um reconhecimento geológico de uma determinada zona, independentemente da tipologia do terreno ou da intervenção, é fundamental a análise prévia de toda a região, recolhendo toda a informação de natureza topográfica, dados geológicos,

morfológicos, sísmicos, hidrológicos, etc., uma panóplia de dados prévios que determinarão o tipo de intervenção no terreno bem como fulcrais na interpretação dos dados a obter futuramente.

A observação direta do maciço rochoso em estudo, bem como da sua envolvente, torna-se por vezes, determinante na escolha do processo de estudo e na definição de zonas de intervenção (pré-zonamento) dos trabalhos com objetivos diferentes para a obtenção dos dados.

3.2.2. Cartografia de Zonamento Geotécnico

A cartografia geotécnica representa a matriz para os trabalhos de campo que resultam no reconhecimento e caracterização, resultando numa estrutura fundamentada e de base suficiente capaz de suportar os dados obtidos nos referidos trabalhos de campo.

No maciço rochoso devem diferenciar-se os diferentes e diversos tipos de material rocha presentes, tendo em conta, principalmente, a heterogeneidade litológica presente, a geoestrutura, os graus de alteração e de fraturação, a hidrologia recorrente no maciço rochoso e a sua resistência mecânica, permitindo posteriormente a divisão do maciço, ou do local em estudo, em subzonas geotécnicas (ISRM, 1981; GSE, 1995; CFCFF, 1996).

3.2.3. Parâmetros dos Maciços Rochosos

Segundo autores como González de Vallejo & Ferrer (2011), uma caracterização global com qualidade, que caracterize de forma credível o maciço, deverá desenvolver-se a partir dos dados obtidos no estudo dos afloramentos, simultaneamente com a descrição da petrofísica da matriz rochosa e das condições geotécnicas das descontinuidades identificadas. Para além destes aspetos atrás referenciados são ainda importantes os seguintes:

- i. Número e orientação das descontinuidades;
- ii. Dimensão e tipologia do bloco unitário, bem como a intensidade de fraturação;
- iii. Índice de qualidade da rocha (RQD);
- iv. Grau de alteração.

Segundo as normas da ISRM (1978), sendo sempre dependente da zona em estudo, da área que ela ocupa, bem como do objetivo do estudo, deverão ser identificadas aproximadamente entre 150 a 200 descontinuidades.

Estes valores não são demasiado elevados se tivermos em conta que o comportamento mecânico do maciço rochoso e os mecanismos que promovem as roturas são determinados, na maioria dos

casos, pelo número de famílias de descontinuidades. O grau de fraturação de um maciço, bem como o tamanho dos seus blocos unitários, são parametrizados pelas designadas famílias de descontinuidades e pelo espaçamento existente entre elas, podendo afirmar-se que o bloco unitário é um produto da interação entre estas duas características do maciço.

Para se determinar as famílias de descontinuidades recorre-se aos diagramas geológico-estruturais, designadamente os diagramas de contorno estrutural e os diagramas de rosetas, permitindo avaliar a orientação de cada uma das descontinuidades cartografadas e estimar a orientação média de cada família de descontinuidades (Priest, 1993; Palmström & Stille, 2010).

A determinação do bloco unitário nos maciços rochosos representa uma importância significativa, podendo ser determinado do modo referido anteriormente e através das seguintes expressões presentes no quadro 1 (ISRM, 1978; Palmström & Stille, 2010; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Quadro 1. Determinação do tamanho dos blocos (ISRM, 1978; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

<p>Índice do tamanho do bloco Lb (Block Size Index) e – espaçamento das famílias</p>	$lb = \frac{e_1 + e_2 + e_3}{3}$
<p>Índice volumétrico das descontinuidades Jv (Volumetric Joint Count)</p>	$Jv = \frac{N^{\circ} \text{ de descontinuidades}}{\text{Comprimento médio}}$
<p>Frequência das descontinuidades λ</p>	$\lambda = \frac{1}{\text{Espaçamento médio das descontinuidades}}$
	$\lambda = \frac{N^{\circ} \text{ de descontinuidades}}{L (m)}$

O parâmetro referente ao índice volumétrico das descontinuidades, Jv , permite classificar o tamanho dos blocos, representando o número total de descontinuidades que interseccionam a unidade de volume do maciço rochoso (ISRM, 1981). Este parâmetro de análise é normalmente utilizado para estudos de compartimentação de maciço, representado um bom índice para avaliar a qualidade de um determinado maciço.

No quadro 2 são apresentados os valores de Jv e a respetiva descrição.

Quadro 2. Classificação do tamanho dos blocos em função do J_v (adaptado de ISRM, 1978).

J_v (descontinuidades/m³)	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 30	30 - 60	> 60
Descrição	Blocos muito grandes	Blocos grandes	Blocos médios	Blocos pequenos	Blocos muito pequenos	Rocha esmagada

O índice RQD, *Rock Quality Designation*, proposto por Deere (1963) (com atualizações propostas por Deere et al., 1967, Deere & Deere, 1988), tem sido largamente utilizado como índice de avaliação da qualidade da rocha em termos geotécnicos. Este índice avalia a qualidade dos maciços em função da observação do tarolo de sondagem retirado do seu interior, contabilizando apenas os pedaços maiores que 10 cm presentes no comprimento total do tarolo. A obtenção deste índice resulta da seguinte expressão:

$$RQD (\%) = \frac{\sum \text{fragmentos de dimensões maiores que 10 cm}}{\text{comprimento total do tarolo de sondagem}} \times 100$$

Uma outra forma de determinar este índice de qualidade da rocha é baseada em correlações empíricas apresentadas por Palmström (1975):

$$RQD = 115 - 3,3 \times J_v \rightarrow J_v > 4,5$$

$$RQD = 100 \rightarrow J_v \leq 4,5$$

Com base num outro parâmetro apresentado anteriormente, a frequência das descontinuidades (λ), é possível a determinação de um valor teórico de RQD (Priest, 1993) segundo a seguinte expressão:

$$RQD \approx 100^{(-0,1 \times \lambda)} \times (0,1 \times \lambda + 1)$$

Para melhor interpretar os dados destas expressões, Deere et al. (1967) apresentaram o seguinte quadro 3 onde é definida a qualidade do maciço em função do índice RQD.

Quadro 3. Correlação entre o índice RQD e a qualidade do maciço rochoso (adaptado de Deere et al., 1967).




RQD- <i>Rock Quality Designation</i> (%)	< 25	25 - 50	50 - 75	75 - 90	90 - 100
Descrição da qualidade do maciço rochoso	Muito fraca	Fraca	Razoável	Boa	Muito boa

3.2.4. Parâmetros Geológicos-Geotécnicos das Descontinuidades


O estudo das descontinuidades, como facilmente se depreende ao longo desta disposição de conteúdos, é um fator fulcral no estudo, caracterização e avaliação de um maciço rochoso. São as descontinuidades que influenciam de forma direta o comportamento do maciço, principalmente a deformabilidade, a resistência e a permeabilidade, podendo dessa forma controlar a estabilidade do mesmo. Para que se possa caracterizar de uma forma completa e integrada as descontinuidades é necessário incluir os seguintes parâmetros que serão apresentados de forma mais completa no quadro 4 (ISRM, 1981):

- i. Atitude geológica;
- ii. Grau de alteração;
- iii. Grau de fracturação (espaçamento entre descontinuidades);
- iv. Abertura;
- v. Preenchimento;
- vi. Rugosidade;
- vii. Continuidade;
- viii. Terminação;
- ix. Resistência mecânica;
- x. Percolação da água.

Quadro 4. Síntese dos parâmetros geológicos-geotécnicos das discontinuidades (ISRM, 1978, 1981, 2007, 2015).

Parâmetro	Descrição	Equipamento	Exemplo de Aplicação Prática e/ou Quadros de Classificação				Representação Esquemática	
Atitude Geológica	Neste parâmetro está englobada a caracterização por meio de identificação da direção e inclinação de uma discontinuidade. A direção representa o ângulo que uma linha horizontal do plano define com o Norte magnético. A inclinação é definida pelo ângulo que a reta de maior declive, perpendicular à direção, define com o plano horizontal.	Bussôla de Geólogo com inclinômetro.	Ex.: N16°E; 77°SE - desta forma, a direção será N16°E e a inclinação 77°SE.					
Grau de Fraturação e Espaçamento	O grau de fraturação corresponde à distância entre as discontinuidades medidas através da fita graduada (scanline). O espaçamento corresponde à distância perpendicular entre duas discontinuidades, sendo maior quanto menor for o grau de fraturação do maciço.	Fita graduada, bem esticada entre dois pontos evitando a inclinação da mesma e cujo comprimento seja ao longo de toda a área de estudo. Quanto maior o número e área de medições, maior o sucesso do estudo.	Intervalo (cm)	Nomenclatura	Designação			
			>200	F1	F1 - 2	Muito afastadas		Afastadas
			60 - 200	F2		Afastadas		
			20 - 60	F3	F3	Medianamente afastadas		Medianamente afastadas
			6 - 20	F4	F4 - 5	Próximas		Próximas
<6	F5	Muito próximas						
Abertura	A abertura corresponde à medida na perpendicular das paredes próximas de uma determinada discontinuidade. A abertura tem a tendência de diminuir à medida que se avança para o interior do maciço.	Régua com precisão e marcação dos milímetros, colocada perpendicularmente às paredes da discontinuidade medida.	Abertura (mm)	Descrição				
			<0,1	Muito fechadas			Fechadas	
			0,10 - 0,25	Fechadas				
			0,25 - 0,50	Parcialmente Abertas				
			0,50 - 2,50	Abertas			Entreabertas	
			2,50 - 10	Medianamente amplas				
			>10	Amplas				
			10 - 100	Muito amplas			Abertas	
			100 - 1000	Extremamente amplas				
>1000	Cavernosas							
Preenchimento	Este parâmetro refere-se ao material que se encontra no local anteriormente designado com sendo a abertura, ou seja, entre as paredes de uma dscontinuidade.	Inspeção visual, usando por vezes o tato e sensibilidade para definir o tipo de material de preenchimento ou enchimento.	Alguns Tipos de Enchimento					
			a) Argila		d) Terra vegetal			
			b) Quatzo		e) Outro (descrever o enchimento)			
			c) Rocha esmagada		etc.			
Rugosidade	A rugosidade associa-se às irregularidades presentes nas paredes de cada discontinuidade medida. Esta parâmetro está implicitamente ligado à resistência ao corte do maciço, dado que, quanto maior a rugosidade (ou aderência) menor a possibilidade de ocorrer uma rotura.	Inspeção visual associada à sensibilidade do tato e definindo dessa forma a rugosidade em função da repetitiva classificação.	Classe	Descrição	Designação	Forma de perfil		
			I	Rugosa	R1 - 2	Plana		
			II	Lisa	Pouco rugosa			
			III	Estriada	R3	Ondulada		
			IV	Rugosa				
			V	Lisa				
			VI	Estriada	R4 - 5	Denteada		
			VII	Rugosa				
			VIII	Lisa	Muito rugosa			
IX	Estriada							
Continuidade	Define o comprimento de uma discontinuidade. Não sendo de muito fácil determinação é fundamental verificar a extremidade da superfície, ou seja, onde termina o comprimento da discontinuidade. Este parâmetro tem influência nas características mecânicas que potenciam as superfícies de rotura.	Para este parâmetro é usada uma fita graduada para medir todo o comprimento da discontinuidade.	Comprimento, L (m)		Continuidade			
			<1		Muito pouco contínua			
			1 - 3		Pouco contínua			
			3 - 10		Medianamente contínua			
			10 - 20		Muito contínua			
>20		Extremamente contínua						

Quadro 4. (Continuação)

Parâmetro	Descrição	Equipamento	Exemplo de Aplicação Prática e/ou Quadros de Classificação			Representação Esquemática
			Nomenclatura	Designação	Descrição	
Terminação	Neste parâmetro tem-se em linha de conta a terminação de uma dada descontinuidade. Poderá terminar numa linha formada por outra descontinuidade, numa zona pertencente ao maciço ou não permitir a observação da sua terminação e dessa forma designar-se como "obscuro".	Inspeção visual.	D	Descontinuidade	Termina numa outra descontinuidade	
			R	Rocha	Termina na própria rocha	
			O	Obscuro	Continuidade ao longo do maciço ou não é possível determinar a sua terminação	
Resistência Mecânica	Este parâmetro corresponde à resistência à compressão uniaxial nas paredes das descontinuidades. A resistência ao corte e a deformabilidade estão diretamente ligadas ao grau de resistência das paredes das descontinuidades.	Existem duas possibilidades mais comuns, sendo elas para duas situações diferentes: Ensaio in situ - Martelo de Schmidt; Ensaio laboratoriais: ensaios de compressão uniaxial.	Classificação	Resistência à compressão simples (MPa)	Designação	
			S1	>200	Muito elevada S1 - 2	
			S2	60 - 200	Elevada Elevada	
			S3	20 - 60	Média	
			S4	6 - 20	Baixa S4 - 5	
			S5	<6	Muito baixa Baixa	
Percolação da Água	A percolação da água é determinada pelo fluxo de água que percorre livremente as paredes das descontinuidades ou todo o maciço. A existência de grandes percolações de água num maciço, poderá dar indicações da existência de alguns problemas de instabilidade no mesmo.	Inspeção visual e sensibilidade do tato. Sempre que existirem considerações que se achem relevantes de referir é fundamental não descorar das mesmas e cololar as considerações no local das observações.	Nomenclatura		Designação	
			S		Seco	
			H		Húmido	
			G		Gotejante	
			F		Fluxo	

3.3. Taludes: Noção, Tipos de Rotura, Análise de Estabilidade

Noção

Os taludes podem ser caracterizados como sendo de dois tipos: naturais e artificiais (figura 7). Os taludes naturais são decorrentes de deslizamentos, desmoronamentos, por rotura do maciço e deslizamento da massa rochosa. Os taludes artificiais são executados pelo Homem com o objetivo de criar plataformas que permitam a criação de estradas, construção de edifícios, etc. Qualquer uma destas intervenções, seja natural ou artificial, cria uma certa instabilidade no maciço rochoso presente no talude, pelo que, a análise de todo o comportamento resultante da alteração decorrente é fundamental para evitar que os processos de meteorização posteriores agravem a referida instabilidade (e.g., Wyllie & Mah, 2004; Chaminé et al., 2010b; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

No caso específico dos taludes naturais, é fulcral a análise da estabilidade do maciço rochoso exposto e verificar se a queda de blocos ou instabilidade total da face do talude, representa um risco para pessoas e bens.

No caso dos taludes artificiais a situação é, em teoria, mais controlada, pelo que a drenagem e correta execução do talude (escolha da técnica de desmonte, inclinação, sistema de contenção, etc.) representam as principais noções a ter em conta aquando da intervenção. Nestes casos não são de prever a rotura total do talude nem a queda de blocos, embora por vezes tal aconteça devido a más escolhas, mau controlo ou simplesmente a fatores externos com os quais não seriam de esperar que acontecessem.

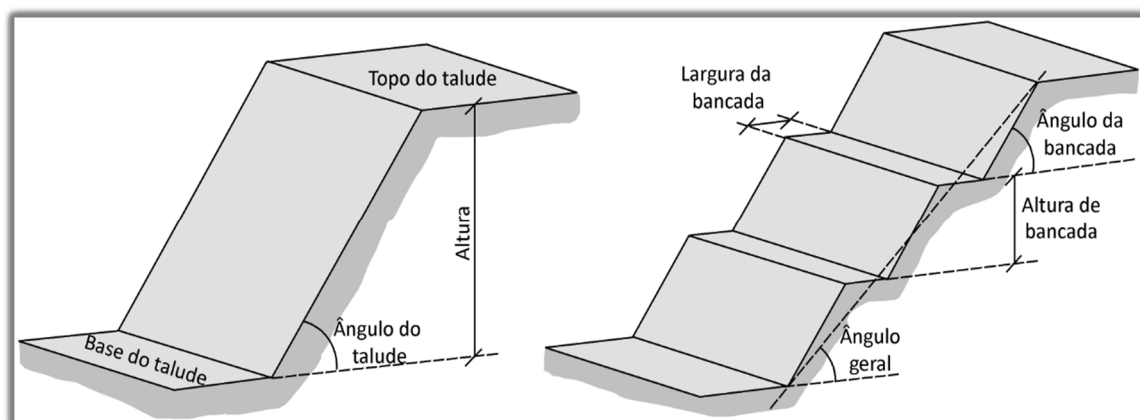


Figura 7. Representação esquemática de taludes (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Tipos de Rotura

Nos taludes rochosos podem ser verificados três tipos de roturas que são dependentes de dois fatores interligados entre si e que definem a tipologia de rotura decorrente desses dois fatores. Os fatores que influenciam as diferentes roturas são o grau de fraturação do maciço e a orientação e distribuição das descontinuidades que compõem o talude, ficando a estabilidade dos blocos definida pelos fatores de resistência das descontinuidades e da matriz rochosa. Os tipos de roturas que podem ocorrer num talude rochoso são (e.g., Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Wyllie, 2014):

- Rotura Planar;
- Rotura em Cunha;
- Rotura por Tombamento.

a) Rotura Planar

Quando uma rotura ocorre ao longo de uma determinada superfície pré-existente, que poderá ser uma qualquer descontinuidade (e.g., diaclase, falha, fratura, etc.).

Para que este tipo de rotura ocorra é apenas necessário que as descontinuidades presentes no maciço tenham a mesma inclinação e direção a favor do talude, cumprindo-se dessa forma a condição de que a inclinação da descontinuidade (α) deverá ser menor que a do talude (ψ) e superior ao seu ângulo de atrito interno (ϕ) (Wyllie & Mah, 2004) (figura 8).

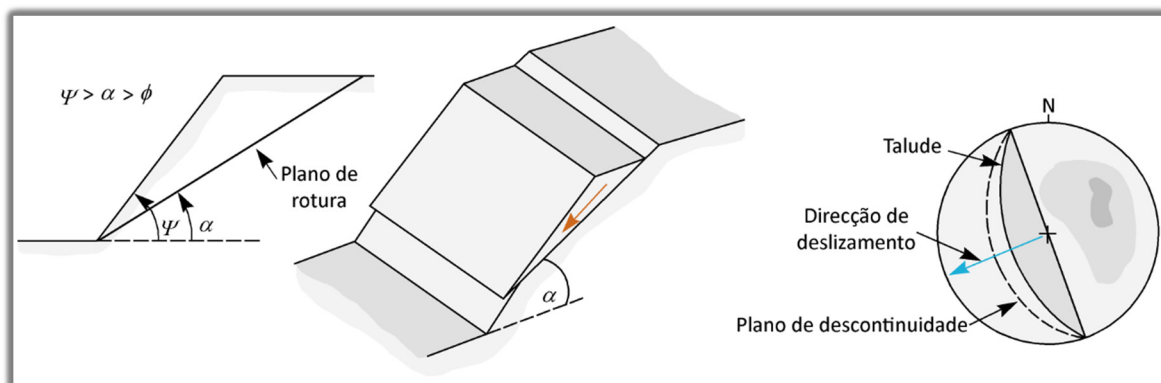


Figura 8. Representação esquemática de uma rotura planar (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

b) Rotura em Cunha

Este tipo de rotura caracteriza-se pelo deslizamento de um bloco, com a forma de uma cunha, resultante da interseção de dois planos de discontinuidades.

A ocorrência deste tipo de rotura é proveniente da mesma condição anteriormente referida, ou seja, a inclinação das discontinuidades, neste caso, a sua linha de interseção, deverá ser inferior à inclinação do talude e superior ao seu ângulo de atrito interno.

Este tipo de roturas em cunha são muito comuns em maciços rochosos com muitas famílias de discontinuidades, sendo limitadas as referidas cunhas, por três tipos de parâmetros: a orientação, o espaçamento e a continuidade, que interligados entre si serão determinantes para a formação de cunhas de blocos (Wyllie & Mah, 2004) (figura 9).

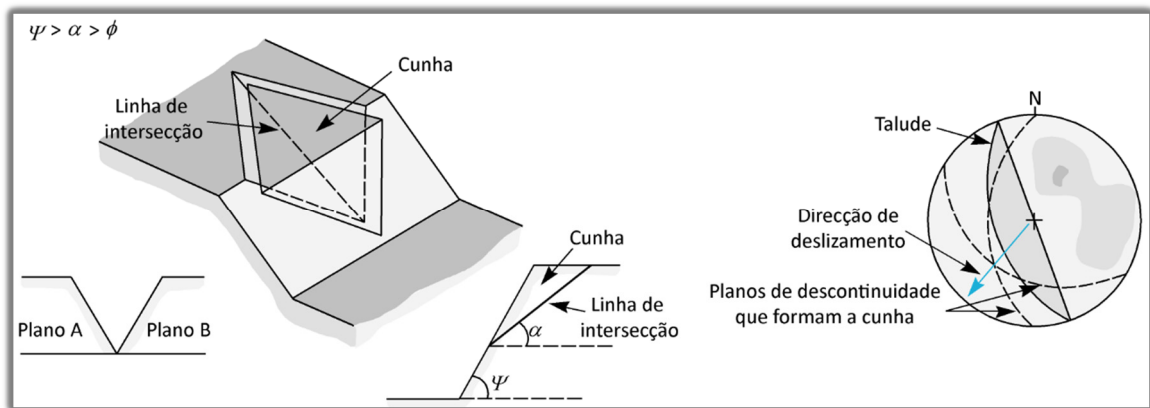


Figura 9. Representação esquemática de uma rotura em cunha (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

c) Rotura por Tombamento

Estas roturas ocorrem em taludes rochosos onde as discontinuidades que fazem parte deste apresentam inclinações contrárias ao talude e uma direção paralela ou sub-paralela ao mesmo.

Na maioria dos casos o maciço que constitui o talude apresenta-se sob a forma de blocos individualizados por ação de um sistema de discontinuidades ortogonais entre si.

Para que se dê a rotura por tombamento, está implícito o movimento de rotação dos blocos, não estando a estabilidade desses blocos exclusivamente condicionados pela sua resistência ao deslizamento (Wyllie & Mah, 2004) (figura 10).

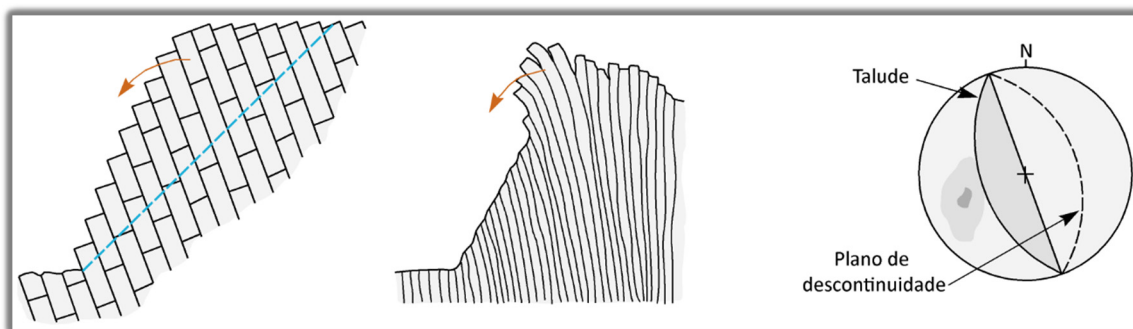


Figura 10. Representação esquemática de uma rotura por tombamento (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Análise de Estabilidade

Esta fase de operação poderá ser executada em duas fases distintas, sendo elas na fase de projeto ou quando o talude se encontra numa fase de possível instabilidade, dando-se a intervenção prévia fundamental.

A definição de um coeficiente de segurança adequado, tal como acontece em muitos dos dimensionamentos das outras estruturas naturais e artificiais, torna-se fulcral em função da finalidade e tipologia do talude, seja ele de carácter temporário ou definitivo (Wyllie & Mah, 2004). No caso dos taludes definitivos o coeficiente de segurança mais indicado e que se deverá adotar corresponderá a um valor igual ou superior a 1,5, levando em alguns casos a que este valor suba para os 2,0, em casos onde o nível de segurança se quer mais elevado em função da obra, da envolvente, da exigência e da importância da estrutura. Em taludes temporários, o fator de segurança que se aplica será igual ou inferior a 1,3, para casos onde a estrutura não exige grande necessidade de resguardo de segurança.

Como em qualquer caso onde existam fatores de segurança a ser cumpridos na definição da estrutura, necessariamente, a configuração e geometria desta, será determinada pelo referido fator de segurança, levando por vezes a grandes alterações ao projeto e ideia inicial, devido às medidas de correção ou estabilização a serem implementadas a fim de evitar movimentos do mesmo.

As análises à estabilidade de taludes nem sempre se fazem na fase de projeto, como se refere anteriormente, por vezes, as análises são efetuadas após a execução do talude, mais especificamente, após uma rotura que se quer que seja controlada, sendo mais fácil a determinação do mecanismo, modelo e geometria que provocou a instabilidade do talude. Este tipo de análise torna-se uma ferramenta muito útil para a caracterização geomecânica dos materiais envolvidos e

para o estudo dos fatores que influenciaram a rotura de um determinado talude e cuja informação obtida possa posteriormente ser transferida para outros taludes com as mesmas características e condições envolventes. Os parâmetros característicos como sendo fundamentais no estado e dimensionamento dos taludes são o ângulo de atrito e a coesão dos materiais.

A análise da estabilidade baseia-se em métodos muito específicos de um fundamento físico-mecânico no qual as forças que intervêm no sistema são forças estabilizadoras e desestabilizadoras, que atuam sobre o talude e determinam o comportamento e condições de estabilidade (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004).

Os métodos referidos anteriormente poderão denominar-se como sendo determinísticos e probabilísticos. Os métodos determinísticos indicam se o talude se encontra estável ou não quando as condições em que o mesmo se encontra, selecionando os valores adequados dos parâmetros físicos e resistentes que definem o comportamento do material, são conhecidas, permitindo definir posteriormente o estado de estabilidade ou o fator de segurança. São conhecidos dois grupos, os métodos de equilíbrio limite e os métodos tenso-deformacionais. Os métodos probabilísticos, como o próprio nome indica, têm em consideração a probabilidade de rotura de um talude tendo por base as condições em que se encontra. Tratando-se de um método com alguma dificuldade de aplicação torna-se pouco aplicável.

Os métodos cuja utilização é mais frequente para a análise da estabilidade de taludes são os métodos de equilíbrio limite. Estes analisam o equilíbrio da massa rochosa que se encontra num estado potencialmente instável e consistem em comparar as forças favoráveis ao movimento com as forças resistentes que se opõem ao mesmo, tudo isto ao longo de uma determinada superfície de rotura.

Estes métodos baseiam-se, segundo Wyllie & Mah (2004):

- Na seleção de uma superfície teórica de rotura existente no talude;
- No critério de rotura de Mohr-Coulomb;
- Na definição do “coeficiente de segurança”.

A determinação do coeficiente de segurança (F) resulta do quociente entre as forças estabilizadoras e desestabilizadoras. Em termos de referência das tensões, o mesmo se poderá dizer que o coeficiente de segurança é também o quociente entre as tensões tangenciais resistentes e as tensões tangenciais deslizantes. Apresentam-se as respetivas fórmulas referidas:

$$F = \frac{\text{Forças estabilizadoras}}{\text{Forças destabilizadoras}}$$

Ou,

$$F = \frac{\text{Tensões tangenciais resistentes}}{\text{Tensões tangenciais deslizantes}}$$

Após a avaliação do coeficiente de segurança é necessário avaliar outras possíveis superfícies de rotura até se encontrar aquela cujo coeficiente de segurança seja o menor possível. As forças que atuam sobre o plano de rotura ou deslizamento potencial, supondo que não existem forças externas a atuar sobre o talude, são devidas a vários fatores que determinam as características intrínsecas do talude, sendo elas, o peso do material (W), a coesão (c) e o atrito (ϕ) (figura 11).

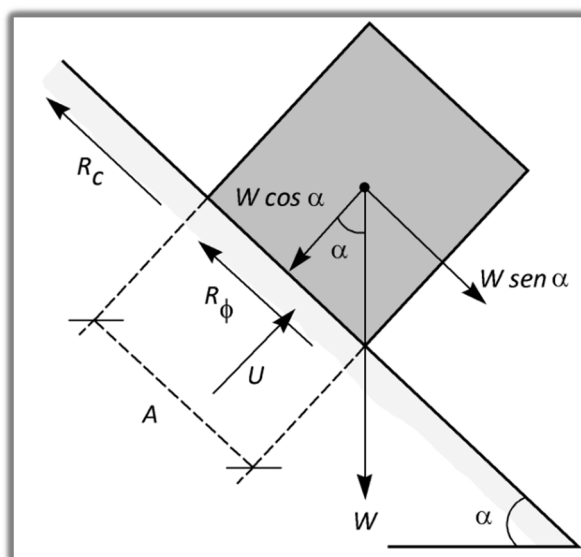


Figura 11. Forças que atuam sobre uma superfície de rotura num talude (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Desta forma, o coeficiente de segurança é obtido pela seguinte expressão:

$$F = \frac{R_c + R_\phi}{S}$$

Em que:

$R_c \rightarrow$ Forças Coesivas = cA

$R_\phi \rightarrow$ Forças de atrito = $W \times \cos \alpha \times \text{tg } \phi$

$S \rightarrow$ Forças que tendem ao deslizamento = $W \times \text{sen } \alpha$

$A \rightarrow$ Área do plano de rotura

No caso em que a pressão da água afeta a superfície de rotura, sendo U a força total devida à água sobre a superfície A , R_ϕ será representado pela seguinte expressão corretiva:

$$R_\phi = (W \times \cos \alpha - U) \text{tg } \phi$$

3.4. Classificações Geomecânicas

3.4.1. Considerações Iniciais

As classificações geomecânicas representam uma ferramenta essencial em todas as intervenções na área de estudo dos maciços rochosos, estando eles enquadrados em qualquer tipologia de estrutura (Bieniawski, 1989). As classificações foram sendo melhoradas ao longo dos anos em função das descobertas de novos elementos que poderiam incorporar as classificações, tais como os elementos de carácter geológico-estrutural, hidrogeotécnico e geomecânico que hoje em dia se recolhe em qualquer maciço rochoso e que ajudará a identificar a qualidade do mesmo (atitude e número de descontinuidades, estado de alteração e fracturação, espaçamento, abertura, rugosidade, continuidade, presença ou ausência de percolação de água, etc.). As classificações geomecânicas, representando uma excelente ferramenta para averiguar a qualidade de um maciço rochoso, não implicam a sua utilização em qualquer tipo de situação e sem ter atenção ao seu campo de aplicação, muito pelo contrário, ou seja, cada umas das classificações tem a sua especificidade e não deverá ser adulterada e aplicada sem nenhum tipo de critério de aplicação e escolha.

Estas classificações representam um sistema de comunicação que engloba todo o tipo de áreas de trabalho, sejam elas de engenharia, geologia, etc., melhorando dessa forma o conhecimento e interação entre as diversas áreas, o que se torna importante quando todas elas têm de interagir num mesmo espaço de projeto e obra.

Alguns dos índices geomecânicos utilizados na classificação geomecânica de taludes rochosos são especificamente o RMR (Bieniawski, 1989) e o SMR (Romana, 1985, 1993, 1997), sendo esta última a que mais aceitação representa desde que se deu o seu surgimento (Romana et al., 2001, 2003).

Os principais tipos de classificações e sistematizações geomecânicas podem ser agrupados nos seguintes tipos (Bieniawski, 1989):

- **Descritivas:** baseiam-se essencialmente nos aspetos mais descritivos;
- **Numéricas:** baseiam-se nas características geotécnicas do maciço e em função das mesmas ser-lhes-á atribuído um “peso” determinado pela classificação;
- **Comportamentais:** baseiam-se em classes que se relacionam com o comportamento do maciço rochoso;
- **Gerais:** baseiam-se numa sistematização sintética para posteriormente ser aplicado em situações mais genéricas da geotecnia;
- **Funcionais:** baseiam-se numa sistematização estruturada para aplicação em situações mais especiais.

As características dos maciços rochosos a serem consideradas para a aplicações das diferentes classificações são, principalmente (Bieniawski, 1989; Hoek, 2007):

- Resistência do material rocha;
- Índice RQD (Rock Quality Designation Index);
- Espaçamento, atitude e condições das descontinuidades;
- Estrutura geológica e falhas existentes;
- Infiltrações, presença e fluxo de água;
- Estado de tensão do maciço.

Ao longo deste trabalho, tendo por base a aplicação de classificações geomecânicas em taludes rochosos naturais, as classificações a serem mais aprofundadas serão a *Rock Mass Rating* (RMR) de Bieniawski (1989, 1993), *Slope Mass Rating* (SMR) de Romana (1993, 1997) e *Geological Strength Index* (GSI) de Hoek et al. (2013). Num outro tópico mais à frente deste trabalho serão apresentadas outro tipo de classificações referentes à perigosidade dos maciços rochosos em taludes.

3.4.2. *Rock Mass Rating* (RMR)

A classificação geomecânica cuja designação mais genérica é RMR (*Rock Mass Rating*) foi criada e desenvolvida por um autor reconhecido na área da engenharia de minas e da mecânica das rochas, Z.T. Bieniawski, tendo sido melhorada ao longo dos anos, fruto de um acumular de experiência adquirida e que permitiu ir atualizando as versões em função disso mesmo (1973, 1976, 1979, 1984, 1989, 1993). Esta classificação tem um campo de aplicação específico, designadamente, em maciços rochosos subterrâneos, cuja aplicabilidade se difundiu nos casos de obra de construção de túneis, mas também podendo ser aplicado em galerias de exploração, galerias de estudo para a construção de barragens, etc. Como já foi referido e vem sendo habitual na aplicação das classificações, esta também se define como aplicando o método de atribuição de pesos e parâmetros previamente definidos na tabela de classificação. De um modo genérico esses parâmetros são de características físicas, geométricas, mecânicas em relação ao maciço e em relação ao material rocha. No quadro 5 é apresentada a classificação RMR original atualizada.

Os parâmetros apresentados na classificação são os seguintes:

- **P₁** – Resistência do material-rocha à compressão uniaxial;
- **P₂** – Grau de fraturação em termos de RQD;
- **P₃** – Espaçamento das descontinuidades;

-
- **P₄** – Condições características das descontinuidades, sendo elas, a rugosidade, continuidade, abertura e preenchimento;
 - **P₅** – Condições hidrogeológicas (infiltração de água);
 - **P₆** – Orientação das descontinuidades em relação à escavação do túnel (se aplicável).

Para se obter o valor de RMR o mesmo é determinado pela soma de todos os parâmetros apresentados anteriormente (P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 e P_6). O valor resultante dessa soma situar-se-á entre 0 e 100, maciço de pior qualidade para maciço de melhor qualidade, respetivamente, obtendo-se o designado *Índice de Qualidade RMR* para cada zona geotécnica determinada.

Como se pôde verificar um dos parâmetros a ter em conta nesta classificação é a resistência do material rocha que poderá ser obtido de uma forma mais expedita através da utilização do Esclerómetro Portátil, ou *Martelo de Schmidt*, com as devidas ressalvas em relação à posição do martelo e conversão de unidades MPa em função do ábaco de Miller (figura 12), através de um ensaio laboratorial de compressão uniaxial realizado em amostras devidamente recolhidas e preparadas, ou ainda, com a realização de um outro ensaio laboratorial, o ensaio de carga pontual (*Point Load Test*). Nas situações onde existam mais do que um conjunto de descontinuidades, os pesos respeitantes ao espaçamento e condições das referidas descontinuidades devem ser consideradas para a situação mais crítica, salvaguardando sempre o lado da segurança (Bieniawski, 1989, 1993).

No momento da atribuição dos pesos é fundamental ter em conta o enquadramento da obra, nomeadamente no parâmetro relacionado com a percolação da água; a importância da percolação da água num túnel subterrâneo é necessariamente diferente à percolação da mesma num talude rochoso, bem como é distinta a forma de solucionar o problema.

Com o valor final de RMR é possível avaliar a qualidade do maciço rochoso e agrupá-lo numa das seguintes categorias: Muito boa, Boa, Razoável, Má e Muito má.

Para cada uma das anteriores categorias estão estabelecidos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb, período de tempo que o maciço admite sem qualquer tipo de suporte e informações sobre a qualidade do maciço atribuído. Para além destes dados, Bieniawski (1989) apresentou ainda um quadro-síntese sobre o método de escavação mais adequado e o tipo de suporte a utilizar em função do tipo de obra, seja ela uma galeria ou um túnel (quadro 6).

Quadro 5. Classificação RMR – *Rock Mass Rating* (adaptado de Bieniawski, 1989).

A - Parâmetros de Classificação e seus Pesos									
Parâmetros			Intervalo de Valores						
P1	Resistência do Material Rochoso Intacto	Ensaio de Carga Pontual (MPa)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Para este intervalo é aconselhável utilizar o ensaio de resistência à compressão uniaxial		
		Resistência à Compressão Uniaxial (Mpa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	4 - 25	1 - 4	< 1
	Peso	15	12	7	4	2	1	0	
P2	RQD (%)	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25			
	Peso	20	17	13	8	3			
P3	Espaçamento das Descontinuidades (m)	> 2	0,6 - 2	0,2 - 0,6	0,06 - 0,2	< 0,06			
	Peso	20	15	10	8	5			
P4	Condições das Descontinuidades (ver E)	Superfícies muito rugosas, pouco contínuas, fechadas e não alteradas.	Superfícies ligeiramente rugosas, com abertura < 1 mm e ligeiramente alteradas.	Superfícies ligeiramente rugosas; com abertura < 1 mm e muito alteradas.	Superfícies lisas ou com preenchimento < 5 mm ou com abertura 1 - 5 mm, contínuas.	Superfícies com enchimento mole com espessura > 5 mm ou aberturas > 5 mm, contínuas.			
	Peso	30	25	20	10	0			
P5	Água Subterrânea	Caudal por 10 m de túnel (l/m)	Nenhum	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Pressão água nas diaclases/tensão principal máxima)	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5			
		Condições gerais	Completamente seco	Ligeiramente húmido	Húmido	Gotejante	Fluente		
	Peso	15	10	7	4	0			
B - Ajustes dos Pesos Devido à Orientação das Descontinuidades (ver F)									
P6		Muito Favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito Desfavorável			
	Túneis e Minas	0	-2	-5	-10	-12			
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25			
	Taludes	0	-6	-25	-50	-60			
C - Classe do Maciço Rochoso Determinado Através da Soma dos Pesos Parciais									
Peso	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21				
Tipo de Classe	I	II	III	IV	V				
Descrição	Rocha de muito boa qualidade	Rocha de boa qualidade	Rocha de qualidade razoável	Rocha de má qualidade	Rocha de muito má qualidade				

Quadro 5. (Continuação).

D - Significado das Classes das Rochas					
Tipo de Classe	I	II	III	IV	V
Tempo Médio de Auto - Sustimento	20 anos para um vão de 15 m	1 ano para um vão de 10 m	1 semana para um vão de 5 m	10 horas para um vão de 2,5 m	30 minutos para um vão de 1 m
Coesão do Maciço Rochoso (kPa)	> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100
Ângulo de Atrito do Maciço Rochoso (°)	> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15
E - Orientação para a Classificação das Condições das Descontinuidades					
Comprimento (Persistência) (m)	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20
Peso	6	4	2	1	0
Abertura (mm)	Nenhuma	< 0,1	0,1 - 1,0	1 - 5	> 5
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito Rugoso	Rugoso	Ligeiramente Rugoso	Macio	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Enchimento Duro < 5 mm	Enchimento Duro > 5 mm	Enchimento Mole < 5 mm	Enchimento Mole > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de Alteração	Inalterado	Ligeiramente Alterado	Moderadamente Alterado	Muito Alterado	Decomposto
Peso	6	5	3	1	0
F - Efeito da Orientação da Direção e da Inclinação das Descontinuidades em Túneis					
Direção Perpendicular ao Eixo do Túnel			Direção Paralela ao Eixo do Túnel		
Escavar a favor da inclinação - inclinação 45° - 90°	Escavar a favor da inclinação - inclinação 20° - 45°		Inclinação - 45° - 90°	Inclinação - 20° - 45°	
Muito Favorável	Favorável		Muito Desfavorável	Razoável	
Escavar contra a inclinação - inclinação 45° - 90°	Escavar contra a inclinação - inclinação 20° - 45°		Inclinação 0° - 20° - Independente da direção		
Razoável	Desfavorável		Razoável		

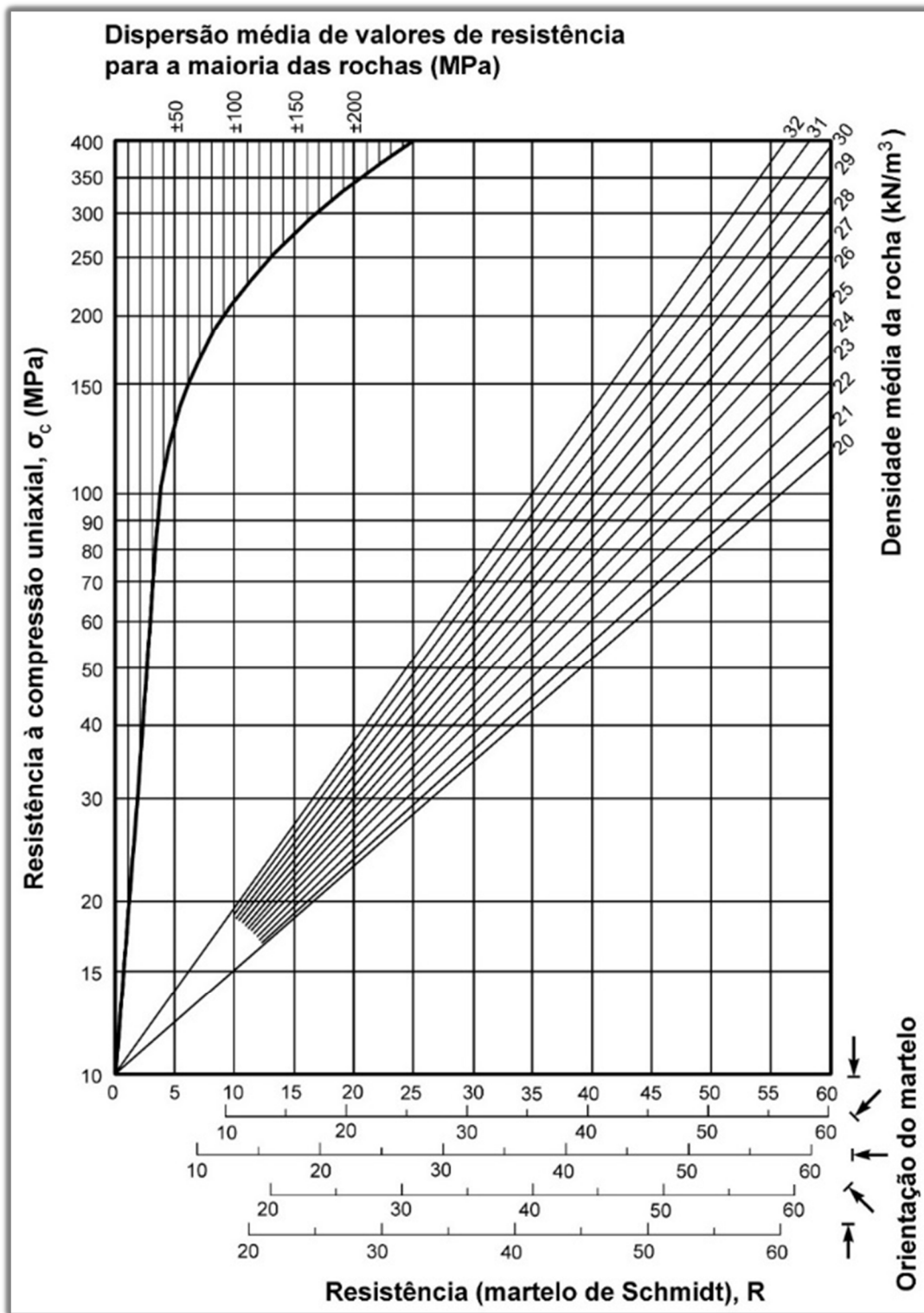


Figura 12. Ábaco de Miller para o cálculo da resistência à compressão da rocha partindo dos dados obtidos do *Martelo de Schmidt* (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Quadro 6. Análise da aplicação prática da classificação RMR por classes em contextos de escavação e sustimento subterrâneo (adaptado Bieniawski, 1989).

Classe		I	II	III	IV	V
Valor RMR		100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Descrição da Qualidade		Muito Boa	Boa	Razoável	Má	Muito Má
Ângulo de Atrito do Maciço		> 45°	45° - 40°	40° - 35°	35° - 30°	< 30°
Período de Estabilidade sem Sustimento		10 anos para um vão de 4 m.	6 meses para um vão de 4 m.	1 semana para um vão de 3 m.	5 horas para um vão de 1,5 m.	10 minutos para um vão de 0,5 m.
Escavação		Secção total, 3 m de avanço.	Secção total, 1,0 a 1,5 de avanço. Suporte completo a 20 m da frente.	Secção parcial (frente e baixo), avanço de 1,5 a 3,0 m. Início do suporte após cada desmonte. Suporte completo a 10 m.	Secção parcial (frente e baixo), avanço de 1,0 a 1,5 m. Instalação do suporte concomitantemente com a escavação.	Secções multiplas, avanço de 0,5 a 1,0 m. Instalação do suporte com a escavação. Betão projetado logo após o desmonte.
Suporte	Pregagens (20 mm de diâmetro envolvidas em betão)	Geralmente não requer suporte, com exceção de pregagens ocasionais.	Pregagens de 3 m de comprimento, espaçadas 2,5 m, ocasionalmente com malha de aço em cartas zonas do teto.	Pregagens sistemáticas com 4 m de comprimento, espaçadas de 2 m nos hasteais e teto, com malha de aço no teto.	Pregagens sistemáticas com 4,5 m de comprimento, espaçadas de 1,0 a 1,5 m com malha de aço no teto e hasteais.	Pregagens sistemáticas com 5 a 6 m de comprimento, espaçadas e 1,0 a 1,5 m com malha de aço no teto e hasteais. Pregagens na soleira.
	Betão Projetado		50 mm no teto quando necessário.	50 - 100 mm no teto; 30 mm nos hasteais.	100 - 150 mm no teto; 100 mm nos hasteais.	150 - 200 mm no teto; 150 mm nos hasteais; 50 mm na soleira.
	Cimbres		Nenhum.	Nenhum.	Cimbres leves a médios espaçados de 1,5 m.	Cimbres médios e pesados espaçados de 0,75 m. Fecho na soleira.

3.4.3. Slope Mass Rating (SMR)

Esta classificação foi criada por Romana (1985, 1993, 1997) e representa uma contribuição à classificação RMR, na medida em que o conceito da classificação pode ser aplicado a taludes rochosos e não só a maciços rochosos subterrâneos.

Este acréscimo à classificação RMR é denominado como *Slope Mass Rating (SMR)*, e obtém-se através da multiplicação de uma série de fatores de ajuste dependentes da relação geométrica existente entre as descontinuidades do talude rochoso, bem como a soma de um outro fator relativo ao método de escavação, e a adição de todos ao valor de RMR.

A seguinte expressão representa o cálculo de SMR:

$$SMR = RMR + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

Os fatores de correção que se apresentam na expressão são os seguintes:

- **F₁** – Fator que depende do paralelismo entre a direção das descontinuidades e a face do talude rochoso. A sua variação é entre os valores 1,00 e 0,15, quando ambas as direções são paralelas e quando o ângulo de atrito entre ambas as direções é maior que 30º e cuja probabilidade de rotura é muito baixa, respetivamente. O cálculo deste fator é ajustado em função da seguinte expressão:

$$F_1 = [1 - (\text{sen } aj - as)]^2$$

Sendo “aj” e “as” os valores correspondentes à direção das descontinuidades e do talude, respetivamente;

- **F₂** – Fator que depende da inclinação das descontinuidades numa rotura planar. A sua variação corresponde aos valores entre 1,00 e 0,15, para as descontinuidades com inclinação superior a 45º e as descontinuidades com inclinação inferior a 20º, respetivamente. A sua expressão que permite o ajuste deste fator é a seguinte:

$$F_2 = tg^2 \times bj$$

Sendo nesta situação o “bj” correspondente à inclinação das descontinuidades. O fator F₂ assume o valor de 1,00 para as roturas por tombamento;

- **F₃** – Resulta da relação entre a inclinação do talude e das descontinuidades presentes no mesmo, tendo sido mantidos os valores apresentados na classificação RMR para o parâmetro P₆ (relativo a taludes e variando entre -60 e 0);
- **F₄** – Fator que ajusta a expressão em função do método de escavação realizado. A sua variação está entre os valores -8 (desmonte com recurso a explosivos) e 15 (talude natural).

As classes em que se poderão agrupar os taludes em função da estabilidade são as seguintes apresentadas no quadro 7.

Quadro 7. Classificação SMR – *Slope Mass Rating* (adaptado de Romana, 1985).

Classe		SMR	Descrição	Estabilidade	Roturas	Tratamento
I	a	91 - 100	Muito Boa	Completamente Estável	Nenhuma	Nenhum
	b	81 - 90				
II	a	71 - 80	Boa	Estável	Alguns Blocos	Ocasional
	b	61 - 70				
III	a	51 - 60	Razoável	Parcialmente Estável	Agumas Descontinuidades ou Muitas Cunhas	Sistemático
	b	41 - 50				
IV	a	31 - 40	Má	Instável	Descontinuidades ou Cunhas Importantes	Importante/Corretivo
	b	21 - 30				
V	a	11 - 20	Muito Má	Completamente Instável	Roturas Planares Importantes ou em Massa	Re-escavação
	b	0 - 10				

Nos quadros 8 a 11 são apresentados os vários tipos de rotura possíveis de ocorrer em função do valor de SMR obtido.

Quadro 8. Rotura planar provável de acordo com o SMR (Romana, 1985, 1997).

Rotura Planar	
SMR > 60	Nenhuma
60 > SMR > 40	Importantes
40 > SMR > 15	Muito Grandes

Quadro 9. Rotura em cunha provável de acordo com o SMR (Romana, 1985, 1997).

Rotura em Cunha	
SMR > 75	Muito Poucas
75 > SMR > 49	Algumas
55 > SMR > 40	Muitas

Quadro 10. Rotura por tombamento provável de acordo com o SMR (Romana, 1985, 1997).

Roturas por Tombamento	
SMR > 65	Nenhuma
65 > SMR > 50	Poucas

Quadro 11. Rotura em massa provável de acordo com o SMR (Romana, 1985, 1997).

Roturas em Massa	
SMR > 30	Nenhuma
30 > SMR > 10	Possível

Na figura 13 são apresentados os diferentes métodos de suporte obtidos com os valores de SMR, que deverão ser posteriormente aplicados em função do zonamento previamente determinado.

Roturas prováveis de acordo com os valores de SMR																
Rotura planar	Muito importante					Importante					Nenhuma					
Rotura em cunha						Muitas					Algumas					
Tombamento						Importante					Pouco importante					
Rotura em massa	Possível										Nenhuma					
SMR	0	10	15	20	30	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100
Re-escavação	Muro de gravidade ancorado Re-escavação															
Drenagem	Drenagem superficial Drenagem profunda															
Betão	Betão projectados Betão de reforço Arcos e/ou vigas Muro de pé de talude															
Reforço	Pregagens Ancoragens															
Protecção	Valetas Rede metálica															
Sem suporte	Saneamento Nenhum															
Métodos de suporte sugeridos																

Figura 13. Métodos de suporte propostos para um determinado valor de SMR obtido (Romana, 1985, 1997).

Esta classificação caracteriza-se pela sua aplicabilidade direta e, como em outras classificações, a cada parâmetro a ser estudado corresponderá uma determinada pontuação. Como em todos estes métodos de classificação, também uma ligeira interpretação menos cuidadosa de um parâmetro ou extrapolação mal apurada poderá levar facilmente a uma designação na classe da qualidade do maciço rochoso bem diferente da realidade, pelo que, nesta situação, será importante o espírito crítico e de interpretação de quem aplica esta classificação.

3.4.4. Geological Strength Index (GSI)

A determinação da resistência de um maciço rochoso pode ser obtido através de métodos empíricos (Hoek & Brown, 1980; Hoek et al., 2002, 2013; Hoek, 2007), embora, dada a complexidade do sistema composto pelo maciço rochoso e o material-rocha, será de importância fulcral o estudo complementar da resistência através de ensaios *in situ* e ensaios laboratoriais.

Com base em vários dados obtidos em experiências realizadas com material rocha e com base nos princípios básicos da mecânica das rochas, Hoek & Brown (1980) determinaram com sustentação na teoria de Griffith, para rochas intactas, o designado *Critério de Rotura de Hoek & Brown*, que se apresenta pela seguinte expressão:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Sendo, σ'_1 e σ'_3 , as tensões principais efetivas máximas e mínimas de rotura, respetivamente. O valor de m_i é uma constante da rocha intacta. Desta forma pode aferir-se que a relação entre as tensões principais na rotura para uma determinada rocha é definida tendo em conta os parâmetros da resistência à compressão simples, σ_c , e a constante m_i . Os valores destas constantes devem ser determinadas, sempre que possível, através de uma análise estatística baseada em resultados de ensaios laboratoriais, mais especificamente ensaios triaxiais levados a cabo segundo as recomendações da ISRM (2007). Os valores de m_i podem ser determinados segundo o quadro 12 proposto por Hoek (1994).

Para além da anterior expressão apresentada, os mesmos autores, apresentaram uma outra que resultou na generalização da anterior e que avalia o critério de resistência para os maciços rochosos, dando origem à seguinte expressão:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a$$

Sendo neste caso, m_b o valor reduzido do parâmetro m_i , s e a são parâmetros que dependem das características do maciço rochoso.

Quadro 12. Valores estimados do m_i (adaptado de Hoek, 2007).

Tipo de Rocha	Classe	Grupo	Textura			
			Grosseira	Média	Fina	Muito fina
Sedimentar	Clástica		Conglomerado (22)	Arenito (9)	Siltito (9)	Argilito (4)
			Grauvaque (18)			
	Não-clástica	Orgânica		Cré (18) Carvão (8-21)		
		Carbonatada	Brecha (20)	Calcário compacto (10)	Calcário grosseiro (8)	
		Química		Gesso (16)	Anidrito (13)	
Metamórfica	Não foliada	Mármore (9)	Corneana (16)	Quartzito (24)		
	Ligeiramente foliada	Migmatito (30)	Anfibolito (31)	Milonito (24)		
	Foliada *	Gnaisse (33)	Xisto (10)	Filito (20)	Ardósia (9)	
Ígnea	Clara		Granito (33)		Riólito (16)	
			Granodiorito (30)		Dacito (17)	
			Diorito (28)		Andesito (19)	
	Escura		Gabro (27)	Dolerito (19)	Basalto (17)	
			Norito (22)			
	Tipo piroclástica extrusiva	Aglomerado (20)	Brecha (18)	Tufo (15)		

Com o objetivo de determinar os parâmetros constantes da equação, Hoek (1994) e atualizações em Hoek et al. (2013), apresentou um índice geotécnico denominado por GSI (*Geological Strength Index*) que fornece um parâmetro geotécnico “resistência” do material-rocha que varia entre 0 e 100. O conceito de criação desta classificação está baseado no facto de a resistência de um maciço rochoso depender de vários fatores, sendo neste caso em específico considerados dois deles, as propriedades da rocha intacta e a possibilidade que cada bloco individualizado da rocha tem de escorregar ou rodar sob diferentes condições de tensão em que se encontra.

Com exceção dos maciços que se classificam de muito má qualidade, o valor de GSI de um dado maciço pode ser determinada pela obtenção de um valor na classificação RMR (Bieniawski, 1989), usando para isso valores corretivos de 15 para a condição da presença de água e de 0 para a orientação das descontinuidades. Desta forma, para os maciços com $RMR \geq 23$, a relação entre as duas classificações obtém-se através da seguinte expressão:

$$GSI = RMR - 5$$

Nos casos onde os maciços rochosos são de má qualidade e cujos valores de RMR obtidos são inferiores a 23, a correlação é expressa com base na seguinte expressão:

$$GSI = \ln Q' + 44$$

Em que,

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a}$$

Sendo:

RQD – Rock Quality Designation

Jr – Índice de rugosidade

Jn – Nº de famílias de descontinuidades

Ja – Índice de alteração das descontinuidades

Em alternativa ao cálculo desta expressão poderá ser usado o ábaco presente da figura 14 que representa os valores de GSI sob a forma de intervalos, tendo em conta a posterior adaptação desta classificação de Hoek (1994), (GSI – versões 1998 e 2013) (Hoek et al., 1998, 2013; Marinos & Hoek, 2000; Marinos et al., 2005) que veio trazer a possibilidade de obtenção de um valor exato em sobreposição à anterior versão que apenas permitia obter valores sob a forma de intervalos de GSI.

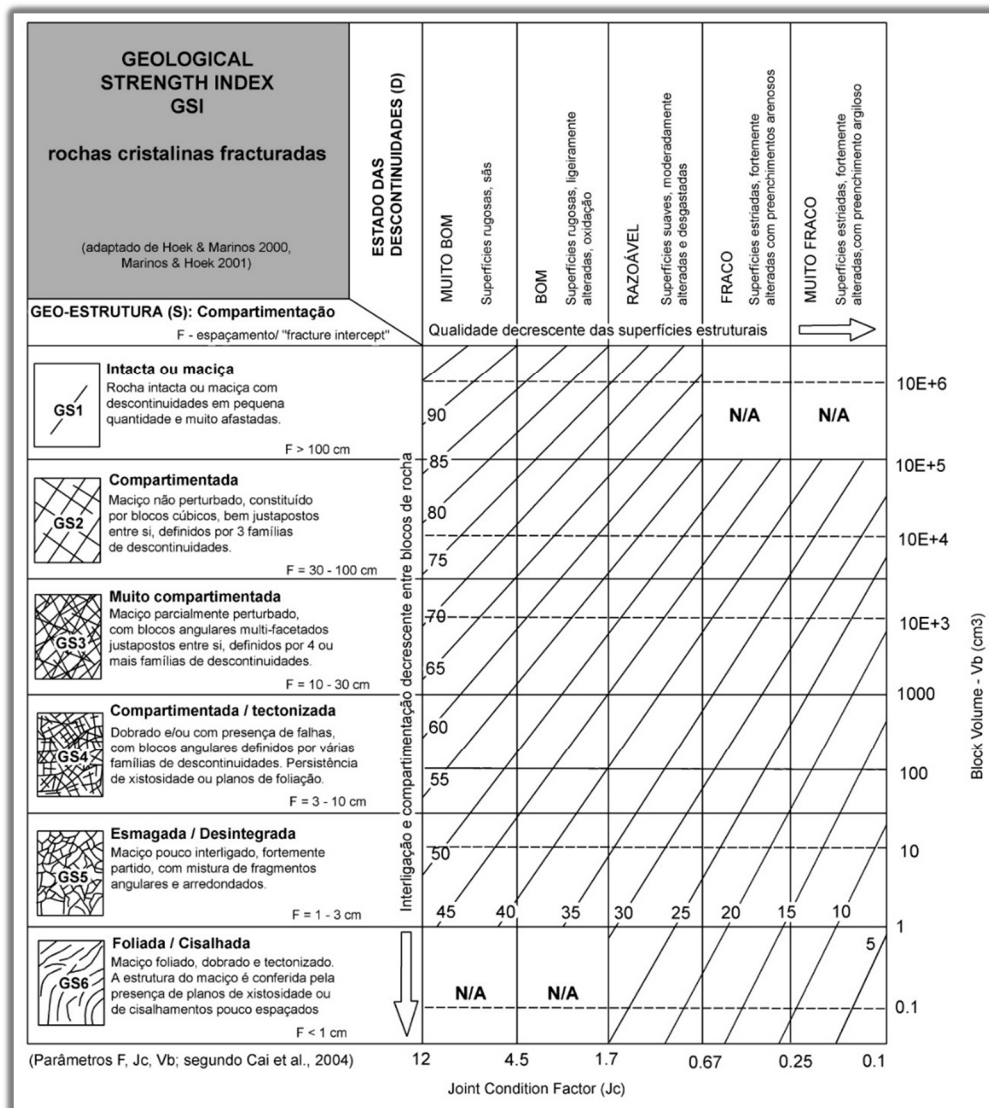


Figura 14. Determinação do valor de GSI (adaptado de Hoek & Marinos, 2000; Marinos & Hoek, 2001).

GSI (Versão 2013)

Esta classificação, como acontece habitualmente com todas as classificações de mecânica das rochas, foi sofrendo alterações ao longo do tempo, em função da aplicação prática de determinada classificação, foram sendo encontradas lacunas e/ou aspetos que poderiam ser melhorados para que as classificações ficassem cada vez mais completas. O mesmo aconteceu com a *Geological Strength Index* (GSI).

No resumo referente ao artigo publicado do GSI (versão 2013) (Hoek et al., 2013) pode apreender-se que a versão original do quadro de classificação foi desenvolvida a pensar na interpretação mais assertiva por parte dos geo-profissionais, algo que não seria tão possível com as anteriores versões um pouco menos objetivas e que dependiam um pouco da interpretação de cada profissional em determinada frente de trabalho (Santa et al., 2016). Com base em tudo isto, encontrou-se a

necessidade de uniformizar e quantificar o ábaco original com base em parâmetros concretos de avaliação do maciço, sendo eles, o RQD (*Rock Quality Designation*) e o estado das descontinuidades. Ao ábaco referente à classificação GSI publicado por Hoek & Marinos (2000), foram adicionadas duas escalas, cada uma delas referente aos dois parâmetros mencionados anteriormente. O eixo vertical está dividido em 4 intervalos de 10 valores, num máximo de 40 pontos e o eixo horizontal encontra-se dividido em 5 intervalos de 9 valores, representando este eixo um máximo de 45 pontos. No que diz respeito à estrutura do ábaco, as avaliações dos maciços intactos e maciços foliados/laminados, não foram consideradas no procedimento de avaliação por se considerar que não reúnem as condições de isotropia e homogeneidade (para o caso dos maciços intactos) e dessa forma, não obedecendo às regras de interação entre os blocos que sustentam a base da classificação GSI. A figura 15 representa o GSI (versão 2013), com todas as suas alterações referenciadas anteriormente.

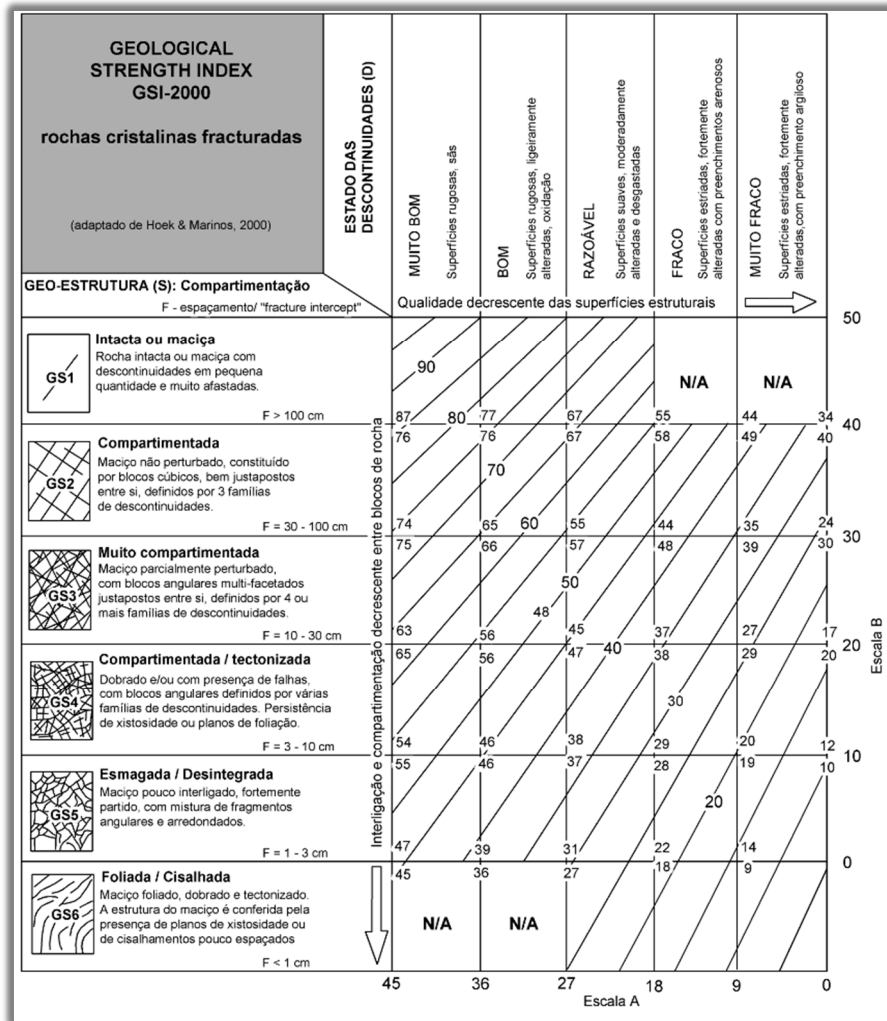


Figura 15. Adaptação do ábaco de classificação do GSI para quantificação (adaptado de Hoek et al., 2013).

Para cada uma das escalas (horizontal e vertical), definida e apresentada a distribuição dos intervalos de valores referidos, foi necessário definir os parâmetros de atribuição de valores correspondentes a cada escala, sendo no caso da escala horizontal o *Joint Condition* (J_{Cond89}) definido por Bieniawski (1989) representado no quadro 13 e as respetivas características das descontinuidades são avaliadas conforme os parâmetros da classificação RMR (ver quadro 14).

Quadro 13. Classificação das características das descontinuidades (adaptado de Bieniawski, 1989).

Características das descontinuidades	Paredes rugosas; descontínuas; fechadas; paredes sem alteração	Paredes ligeiramente rugosas; abertas <1 mm; paredes ligeiramente alteradas	Paredes ligeiramente rugosas; abertura <1 mm; paredes muito alteradas	Paredes lisas ou preenchimento argiloso <5 mm; contínuas; abertura 1 – 5 mm	Paredes lisas ou preenchimento argiloso >5 mm; contínuas; abertura >5 mm
Valor	30	25	20	10	0

Quadro 14. Descrição e respetivos pesos atribuídos às condições das descontinuidades na classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).

Comprimento da descontinuidade (m)	<1	1 – 3	3 – 10	10 – 20	>20
	6	4	2	1	0
Separação (abertura) (mm)	Fechada	<0,1	0,1 – 1,0	1 – 5	>5
	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Ligeiramente rugosa	Lisa	Espelhada
	6	5	3	1	0
Enchimento (mm)	Nenhum	<5; duro	>5; duro	<5; mole	>5; mole
	6	4	2	2	0
Alteração	Não alterada	Ligeiramente alterada	Moderada	Muito alterada	Decomposta
	6	5	3	1	0

No caso da escala vertical, referente à compartimentação do maciço, foi definido o já mencionado valor de RQD (Deere, 1963; Deere et al., 1967) explicado num tópico anteriormente apresentado.

Uma outra forma de avaliar o RQD, mas de forma indireta, é através do denominado ábaco de Priest (1993) que utiliza o espaçamento médio das descontinuidades e dessa forma obtém-se o limiar do $RQD_{teórico}$ (%) a aplicar posteriormente na classificação GSI. A figura 16 representa o ábaco de Priest (1993).

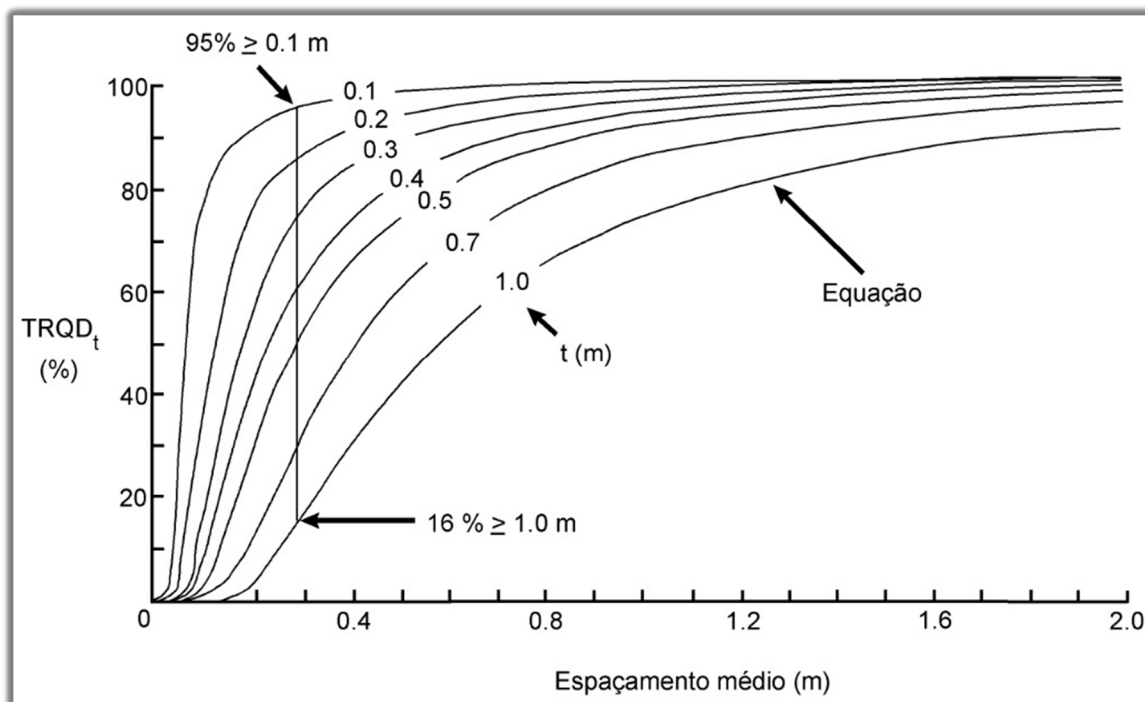


Figura 16. Ábaco para a determinação do $RQD_{teórico}$ através do espaçamento médio das descontinuidades (adaptado de Priest, 1993).

De um modo geral, considera-se o valor de $t=1$ de forma a obter um valor mais conservador em relação ao $RQD_{teórico}$. Os ajustes para as outras curvas do ábaco apenas acontecem se os dados do espaçamento forem estatisticamente representativos e o intervalo de confiança cumprir os $95\% > 0,1\text{ m}$ (Priest, 1993).

De forma expedita pode afirmar-se que o valor de GSI (Hoek et al., 2013) é dado pela expressão:

$$GSI = 1,5 J_{Cond89} + RQD/2$$

Por fim apresenta-se a figura 17 onde é exibida a classificação GSI (versão 2013) final com as escalas horizontal e vertical e a respetiva avaliação do maciço por meio da obtenção de um valor único e não por meio de um intervalo como acontecia nas anteriores classificações GSI.

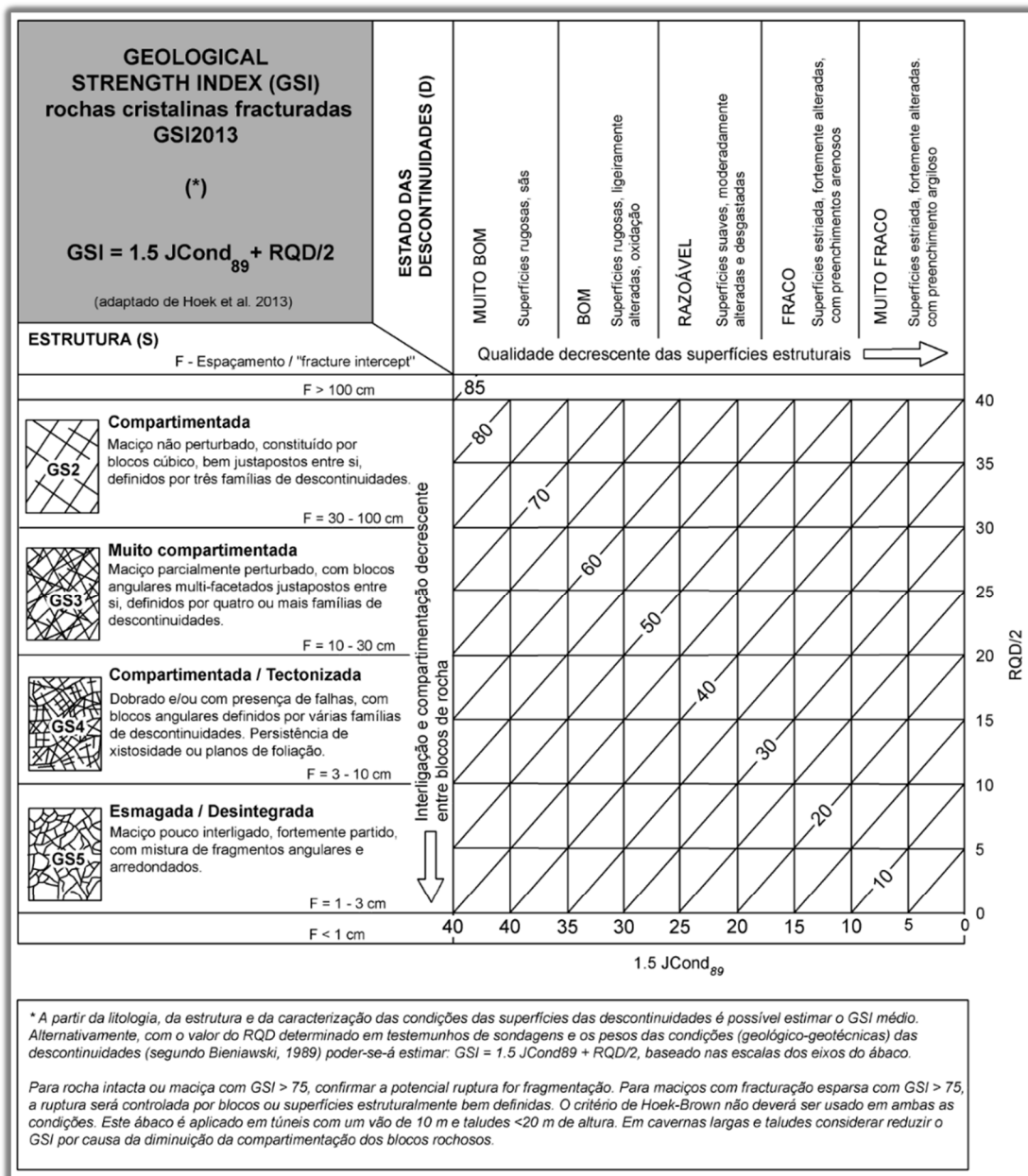


Figura 17. Ábaco de quantificação do valor de GSI (adaptado de Hoek et al., 2013; Santa et al., 2016).

3.5. Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos e Nível de Perigosidade

3.5.1. Considerações Iniciais

Os sistemas de classificação dos maciços rochosos têm um papel fulcral na avaliação das condições de estabilidade de um determinado talude rochoso. Até este tópico foram apresentadas classificações específicas para maciços rochosos (RMR e GSI) e uma classificação mais específica para taludes rochosos (SMR) mas interligada com a RMR.

Neste tópico em específico, as classificações a serem expostas serão mais específicas para o caso dos taludes rochosos à superfície e a respetiva avaliação do seu nível de perigosidade, entenda-se: o Índice de Gravidade de Queda de Blocos (Pacheco, 2015), a *Rockfall Hazard Rating System* de Pierson et al., 1990 (RHRSm2, versão 2015, adaptada por Pinheiro et al., 2015) e a *Slope Quality Index* (SQI, de Pinheiro et al., 2015).

A complexidade na determinação da perigosidade e do risco associados à queda de blocos nos taludes rochosos naturais e artificiais tem conduzido a comunidade científica na procura de novas metodologias para a determinação e identificação dos riscos a fim de os minimizar e controlar. De acordo com o relatório do *Washington State Department of Transportation* (2010), relativo ao programa que controla os taludes que se encontram em situação instável, este fenómeno é considerado um perigo natural que abrange um movimento de uma massa rochosa, ou de solo, com influência direta da gravidade, dando-se grande parte deste fenómeno por ação direta antrópica mas também devido a causas naturais.

Para a avaliação destes fenómenos, existem nos dias de hoje, para aplicação na fase de projeto, várias metodologias que permitem quantificar e gerir de forma mais exata o risco associado a determinado fenómeno, sendo exemplo disso mesmo a utilização de metodologias probabilísticas para ter em conta as incertezas de cada abordagem.

Desta forma, serão aprofundadas as diferentes abordagens já mencionadas para que se possa posteriormente ver aplicada no caso de estudo específico deste projeto de taludes.

3.5.2. Índice de Gravidade de Queda de Blocos (Pacheco, 2015)

Em todas as intervenções de engenharia a inspeção visual cuidada do local onde se irá intervir corresponde a uma tarefa fundamental no sucesso final da operação que se realiza, sendo na inspeção dos taludes, neste caso em específico, muito possivelmente, a etapa mais importante de todas. É com base na inspeção visual realizada de forma criteriosa, organizada, com grande abrangência (não se remetendo apenas ao local de intervenção), que se irá definir o processo de

tomada de decisão dos trabalhos seguintes, sendo todo esse processo definido com base nos dados recolhidos da inspeção visual e que terão influência muito direta no resultado final. No caso particular desta temática dos taludes rochosos, poderá ocorrer uma má escolha e mau dimensionamento da solução de proteção dos blocos se a inspeção do local não for realizado da melhor forma e/ou os dados não forem recolhidos com o critério de profissionalismo necessário.

Por vezes, na fase de inspeção é possível verificar que existem setores cujos comportamentos se assemelham entre si, podendo dessa forma criar uma espécie de pré-zonamento geotécnico em que o tipo de inspeção a realizar nesses setores será diferenciado em função do grau de perigosidade, comportamento esperado, tipo de envolvimento, etc.

Na realização da inspeção dos taludes deverá ser elaborada e devidamente preenchida uma ficha de levantamento de dados onde deverão constar os seguintes dados (Pacheco, 2015):

- i. Localização do bloco a inspecionar (com posicionamento SIG);
- ii. Data de realização da inspeção;
- iii. Responsável pela inspeção;
- iv. Tipo de acesso ao local onde se encontra o bloco.

Na inspeção de cada setor constituinte do talude devem caracterizar-se os seguintes aspetos:

- i. Geologia;
- ii. Geomorfologia;
- iii. Hidroclimatologia;
- iv. Rede hidrográfica;
- v. Geometria;
- vi. Cobertura vegetal;
- vii. Presença de água.

Com a análise das anteriores características é possível avaliar individualmente os blocos e a respetiva análise por setores de perigo a fim de analisar posteriormente os dados obtidos de forma a atribuir uma classe/índice de gravidade e respetiva solução, com o estudo em gabinete.

Dessa forma apresenta-se na figura 18 um exemplo da ficha de inspeção criada para verificação dos blocos.

Ficha de Inspeção (por bloco potencialmente instável)			
<i>Data de inspeção:</i>	<i>Início:</i> <input type="text"/>	<i>Fim:</i> <input type="text"/>	
	<i>Preenchido:</i> <input type="text"/>	<i>Data:</i> <input type="text"/>	
	<i>Verificado:</i> <input type="text"/>	<i>Data:</i> <input type="text"/>	
Identificação			
<i>ID Bloco:</i> <input type="text"/>	<i>Setor:</i> <input type="text"/>	<i>Coordenadas (Hayford-Gauss Datum73):</i>	<i>X:</i> <input type="text"/>
<i>Designação:</i> <input type="text"/>			<i>Y:</i> <input type="text"/>
Condições			
<i>Meteorológicas:</i>	<i>Céu limpo:</i> <input type="text"/>	<i>Acesso:</i>	<i>Directo:</i> <input type="text"/>
	<i>Parcialmente nublado:</i> <input type="text"/>		<i>Binóculos:</i> <input type="text"/>
	<i>Nublado:</i> <input type="text"/>		<i>Inacessível:</i> <input type="text"/>
	<i>Chuva:</i> <input type="text"/>		
Caracterização			
<i>Forma:</i>	<i>Dimensão (cm):</i> <input type="text"/>		
<i>Litologia:</i>			
<i>Grau de alteração (W):</i> <input type="text"/>	<i>Grau de fracturação (F):</i> <input type="text"/>	<i>Classe de resistência (S):</i> <input type="text"/>	
<i>Não isolado:</i> <input type="text"/>		<i>Isolado:</i> <input type="text"/>	
Não isolado			
<i>Descontinuidades:</i>	<i>Abertas:</i> <input type="text"/>	<i>Preenchidas:</i> <input type="text"/>	<i>Material de preenchimento:</i> <input type="text"/>
		<i>Não preenchidas:</i> <input type="text"/>	
	<i>Fechadas:</i> <input type="text"/>	<i>Orientação:</i> <input type="text"/>	
	<i>Com presença de água:</i> <input type="text"/>	<input type="text"/>	
	<i>Sem presença de água:</i> <input type="text"/>	<input type="text"/>	
Tipo de instabilidade potencial:			
<i>Cunha:</i> <input type="text"/>	<i>Toppling:</i> <input type="text"/>		
<i>Planar:</i> <input type="text"/>	<i>Desprendimento:</i> <input type="text"/>		
Isolado			
<i>Superfície de apoio:</i>	<i>Solo:</i> <input type="text"/>	<i>Rocha:</i> <input type="text"/>	<i>Rocha esmagada:</i> <input type="text"/>
	<i>Inclinação aproximada (°):</i> <input type="text"/>		
	<i>Com vegetação:</i> <input type="text"/>	<i>Sem vegetação:</i> <input type="text"/>	
	<i>Com escoamento de água:</i> <input type="text"/>	<i>Sem escoamento de água:</i> <input type="text"/>	

Figura 18. Exemplo da ficha de inspeção (adaptado de NEC & LABCARGA, 2015).

Localização - Fotografias

a *b*

c *d*

Legenda:

Trajectória do bloco - corte transversal

ID Bloco: *Página 2 de 4*

Figura 18. (Continuação).

Anomalias

Presença de descontinuidades (1): Presença de vegetação com efeito instabilizador (4): Presença de blocos com efeito instabilizador (sobrecarga) (6):

Abertura das descontinuidades (2): Deslocamento dos blocos (5): Presença de água nas descontinuidades ou na base dos blocos (7):

Descaçamento (3): Outro (8):

Anomalia	Caracterização da anomalia			Consequência	NGA
	Natureza	Desenvolvimento	Extensão		
0	Pouco grave <input type="checkbox"/>	Limitado e estável <input type="checkbox"/>	<50% do admissível <input type="checkbox"/>	Local <input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
1	Grave <input type="checkbox"/>	Significativo ou em evolução <input type="checkbox"/>	>50% do admissível <input type="checkbox"/>	Global <input type="checkbox"/>	<input type="text"/>

Fotografias ou esquemas interpretativos

<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>

ID Bloco:

Página 3 de 4

Figura 18. (Continuação).

Anomalia	Caracterização da anomalia			Consequência	NGA
	Natureza	Desenvolvimento	Extensão		
0	Pouco grave <input type="checkbox"/>	Limitado e estável <input type="checkbox"/>	<50% do admissível <input type="checkbox"/>	Local <input type="checkbox"/>	<input type="text"/>
1	Grave <input type="checkbox"/>	Significativo ou em evolução <input type="checkbox"/>	>50% do admissível <input type="checkbox"/>	Global <input type="checkbox"/>	<input type="text"/>

Fotografias ou esquemas interpretativos

NGA - Nível de gravidade da anomalia

	Caracterização do bloco		Nível de instabilidade potencial	Caracterização da superfície da trajectória		Anomalia	NGB
	Peso	Forma		Inclinação	Cobertura com solo	NGA	
1	Reduzido <input type="checkbox"/>	Planar <input type="checkbox"/>	Reduzido <input type="checkbox"/>	<30° <input type="checkbox"/>	>60% <input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2	Médio <input type="checkbox"/>	Paralelepipedica <input type="checkbox"/>	Médio <input type="checkbox"/>	>30° e <60° <input type="checkbox"/>	>20% e <60% <input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3	Elevado <input type="checkbox"/>	Esférica <input type="checkbox"/>	Elevado <input type="checkbox"/>	>60° <input type="checkbox"/>	<20% <input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

NGB - Nível de gravidade do bloco (5 a 19)

ID Bloco: Página 4 de 4

Figura 18. (Continuação).

Existem aspetos a ter em conta na inspeção criteriosa dos blocos potencialmente instáveis, devendo para tal ser analisados os seguintes aspetos:

- Forma e dimensão do bloco;
- Litologia;
- Graus de alteração e fraturação (de acordo com a ISRM);
- Classe de resistência (com recurso ao Martelo de Schmidt ou outros ensaios de resistência);
- Definir se o bloco se encontra isolado ou associado ao maciço rochoso.

Existem duas situações cuja avaliação se torna bastante importante para a definição das etapas seguintes, sendo neste caso a definição de bloco não isolado ou isolado, ou seja (pormenores em Pacheco, 2015):

- i. **Bloco não isolado (denominado BL)** – é necessário caracterizar as descontinuidades e indicar o tipo de instabilidade potencial;
- ii. **Bloco isolado (denominado BI)** – é necessário definir a sua superfície de apoio, inclinação, existência ou não de vegetação envolvente e verificação da presença de água.

Posteriormente, tendo por base a anterior análise de blocos isolados ou não isolados, é fundamental definir as trajetórias de cada um deles com recurso a programa informático (e.g., RocFall). Com essa análise será possível avaliar a suscetibilidade e risco de queda do bloco, enquadrando esse mesmo risco com o que ele representa para pessoas, ecossistemas e bens materiais, e na definição de uma solução de proteção ou de estabilização.

A caracterização de anomalias é também uma das verificações importantes de serem realizadas, sendo neste caso muito verificadas as seguintes (Pacheco, 2015):

- Presença de descontinuidades e respetiva abertura;
- Descalçamento;
- Presença de vegetação com efeito instabilizador;
- Deslocamento dos blocos;
- Presença de blocos com efeito instabilizador (sobrecarga);
- Presença de água nas descontinuidades ou na base dos blocos.

Em casos típicos é adotado o critério definido pelo Manual de Especificações Técnicas relativo a Inspeções Principais das Estradas de Portugal, sendo realizadas algumas adaptações em função da exigência verificada.

À caracterização das referidas anomalias é atribuída uma pontuação que varia entre 0 e 3, resultante da soma das pontuações atribuídas à natureza das anomalias, ao seu desenvolvimento

e à sua extensão. No caso da verificação das consequências das anomalias é atribuída uma classificação a variar entre 0 e 1, para consequências locais e globais, respetivamente. Verifique-se este facto com a análise ao quadro 15.

Quadro 15. Caracterização da anomalia para obtenção do nível de gravidade (segundo Pacheco, 2015; NEC & LABCARGA, 2015).

<i>Anomalia</i>	<i>Caracterização da anomalia</i>			<i>Consequência</i>	<i>NGA</i>
	<i>Natureza</i>	<i>Desenvolvimento</i>	<i>Extensão</i>		
<i>0</i>	<i>Pouco grave</i>	<i>Limitado e estável</i>	<i><50% do admissível</i>	<i>Local</i>	
<i>1</i>	<i>Grave</i>	<i>Significativo ou em evolução</i>	<i>>50% do admissível</i>	<i>Global</i>	

Existem situações em que poderão ser verificadas mais do que uma tipologia de anomalias no mesmo bloco analisado, sendo para isso necessário recorrer a um cálculo de ponderação, de modo a que seja possível agravar a gravidade já inerente ao bloco. Dessa forma, elabora-se uma majoração a ser implementada de acordo com o número de anomalias apresentadas e o respetivo fator de agravamento (quadro 16):

Quadro 16. Fator de agravamento em função no número de anomalias (Pacheco, 2015; NEC & LABCARGA, 2015).

Número de Anomalias	Fator de Agravamento
1	0
2	0,1
3	0,25
4	0,5
5	0,8
> 6	0,9

Com recurso ao quadro anterior foi possível determinar o nível de gravidade final da anomalia, de acordo com a seguinte expressão:

$$NGA = NGA' + f$$

Em que:

- **NGA** – representa o nível de gravidade final da anomalia, após agravamento;
- **NGA'** – representa o nível de gravidade da anomalia, antes do agravamento;
- **f** – representa o fator de agravamento.

Como em qualquer classificação foi necessário definir intervalos de valores cuja análise final dos valores obtidos pudesse corresponder a diferentes tipos de gravidade em função das anomalias identificadas com o cálculo do NGA, tendo sido proposto o quadro 17.

Quadro 17. Intervalos de gravidade e respetivo valor de NGA (Pacheco, 2015; NEC & LABCARGA, 2015).

Intervalo de Gravidade	Classificação Final da Anomalia (NGA)
0	0
1 – 1,45	1
1,5 – 2,45	2
2,5 – 3,45	3
3,5 - 4	4

Com a classificação referente às anomalias definidas é importante caracterizar o nível de gravidade dos blocos (NGB).

Para a aplicação desta caracterização é fundamental avaliar parâmetros que ainda não foram mencionados, sendo eles apresentados no quadro 18.

Quadro 18. Parâmetros a serem avaliados para a determinação do NGB (Pacheco, 2015; NEC & LABCARGA, 2015).

Caracterização do Bloco	Nível de Instabilidade Potencial	Caracterização da Superfície da Trajetória
Avaliação do peso	Reduzido	Quanto à inclinação
Identificação da forma	Médio	Quanto à percentagem aproximada de cobertura com solo
	Elevado	

Todos os parâmetros apresentados poderão ter uma classificação que varia entre 1 e 3, de acordo com a gravidade apresentada. Para a obtenção do NGB deverá também ter-se em conta o NGA, de acordo com a seguinte expressão:

$$NGB = \sum_i^n P + NGA$$

Em que:

P – representa os parâmetros avaliados.

Também na definição completa desta caracterização da gravidade do bloco (NGB) é apresentado um quadro de classificação final (quadro 19) com a relação dos valores obtidos da expressão e a respetiva correspondência do nível de gravidade.

Quadro 19. Níveis de gravidade de acordo com o NGB (NEC & LABCARGA, 2015; Pacheco, 2015).

NGB	Nível de Gravidade
5 – 8	Baixo
9 – 12	Médio
13 – 16	Elevado
17 - 19	Muito Elevado

3.5.3. Rockfall Hazard Rating System (RHRSm2, versão 2015)

A avaliação de taludes deve ter em conta diversos fatores, tendo todos eles implicações diretas na estabilidade ou instabilidade dos mesmos. Segundo dados recolhidos pelas Estradas de Portugal e pelo Roteiro para Avaliação de Estabilidade de Rochas e Maciços Rochosos, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas no Brasil e por Gao et al. (2011), foram definidos um total de nove parâmetros necessários para realizar uma avaliação integrada e fiável, de todos os pontos de vista, a realizar em taludes de escavação em rocha (Pinheiro et al., 2015). No quadro 20 apresentam-se os principais fatores e os respetivos parâmetros a serem avaliados.

Quadro 20. Identificação dos fatores e parâmetros em avaliação na proposta do índice de qualidade (adaptado de Pinheiro et al., 2015).

Fator	Parâmetro
Geometria	Altura, inclinação, presença e largura de banquetas;
Geológico	Sistemas de classificação empírica RMR, SMR e Q-system, tipo de formação e avaliação do risco de queda de blocos;
Sistema de drenagem	Sistema de drenagem superficial e profundo (existência de estado de conservação);
Inspeções	Avaliação do estado de manutenção e conservação;
Monitorização	Resultados da monitorização, incluindo: inclinómetros, marcas, topográfica, piezómetros, etc.);
Imediações	Existência de sobrecargas (habitações, etc.) e eventuais vibrações (trabalho, etc.);
Historial	Histórico de acidantes e intervenções;
Revestimento	Proteção superficial (rede metálica, pregagens, etc.) e cobertura vegetal;
Ambiental/Tráfego	Zona sísmica, precipitação e nível de tráfego.

Esta metodologia garante uma análise por cada fator sendo-lhe atribuída uma pontuação a cada um deles, permitindo assim uma melhor perceção do talude em termos mecânicos e definir quais aqueles que representam maior e menor risco, podendo dessa forma intervir atempadamente. A metodologia consiste na definição de 5 intervalos, no máximo, com a respetiva ponderação a variar entre 1 e 5.

Para a avaliação de um dos fatores, o geológico, como se depreende na leitura do quadro anterior, é necessária a aplicação das classificações geomecânicas para maciços rochosos, entenda-se, o *Rock Mass Rating* – RMR (Bieniawski, 1989), *Slope Mass Rating* – SMR (Romana, 1985) e *Q – System* (Barton et al., 1974). Para avaliar o potencial de ocorrência de queda de blocos é utilizado o *Rockfall Hazard Rating System* – RHRS, tendo este sido alvo de algumas modificações.

O *Rockfall Hazard Rating System* (Pierson et al., 1990) foi desenvolvido no departamento de transportes de Oregon (EUA) como sendo um método de classificação de risco específico associado à queda de blocos em taludes rochosos. Este método inclui um total de 8 categorias que são cotadas através de uma escala exponencial que varia desde 3 até 81, correspondendo dessa forma uma cotação final mais elevada a um talude com maior risco de queda de blocos e uma cotação mais baixa a um risco também ele menos elevado (Pinheiro et al., 2015). Após a realização de um inventário preliminar, Budetta (2004) apresentou algumas modificações ao sistema original, adicionando dessa forma duas novas categorias, passando a designar-se este sistema de RHRSm, com um total de 10 categorias.

Segundo Budetta (2004), existe ainda a necessidade de uma aplicação em diferentes ambientes geológicos para melhor validar o método. De acordo com outro autor, Pina (2008), o método RHRSm apresenta algumas limitações, sendo feita referência ao facto de algumas atribuições de valores ser feita de forma direta e outras de forma aproximada para que se enquadre na categoria, sendo de salientar ainda por parte do autor o facto de estar bastante presente a subjetividade e a interpretação de quem aplica a classificação.

Existem fatores que são bastante díspares em todos os países, nomeadamente as condições geotécnicas e ambientais, dessa forma, foi realizada uma nova modificação ao RHRSm proposto por Budetta (2004), adaptando assim as novas modificações às condições típicas das autoestradas, designando-se o novo sistema por RHRSm2 (consultar quadro 21).

Como em todas as classificações existem tabelas interpretativas dos valores finais, sendo neste caso específico a avaliação do risco da queda de blocos. Nesta classificação, inicialmente, só existiam três níveis de risco: baixo, médio e elevado; posteriormente, de forma a completar e adaptar a tabela final para melhorar a integração da nova metodologia RHRSm foram criados mais dois intervalos de risco, passando a tabela final de avaliação de risco a conter cinco níveis (consultar quadro 22).

Estas novas categorias adicionadas consistem em avaliar o seguinte (Budetta, 2004; Pinheiro et al., 2015):

- I. **Inclinação do talude** – a influência deste parâmetro é relevante para o desenvolvimento da queda dos blocos, ou seja, quanto mais inclinado for o talude, maior o risco da queda de blocos e conseqüentemente maior será a velocidade de impacto do bloco na plataforma e o respetivo ressalto deste;
- II. **Zona de influência** – a distância entre o pé do talude e a via de circulação mais próxima está diretamente ligado às conseqüências da queda dos blocos, ou seja, quando maior a zona de influência, maior será o risco associado;
- III. **Quantidade de blocos soltos** – quanto maior o número de blocos soltos, maior a probabilidade de acidentes, ou seja, este parâmetro está diretamente ligado à instabilidade e risco da queda de blocos;
- IV. **Clima** – as elevadas precipitações poderão criar instabilidade nos taludes e aumentar a probabilidade da queda de blocos;
- V. **Largura da plataforma** – a largura deverá ser ajustada tendo como referência o sistema RHRSm;
- VI. **Largura das banquetas** – este novo parâmetro foi incluído tendo em conta que quanto maior a sua largura, maior a sua capacidade de retenção.

Quadro 21. Sistema de classificação RHRSm2 (adaptado de Pinheiro et al., 2015).

Categoria	Critério por Pontos			
	3	9	27	81
Altura do Talude (m)	7,5	7,5 - 22,5	22,5 - 30	> 30
Inclinação (°)	< 30	30 - 40	40 - 50	> 50
Largura das Banquetas (m)	> 4	2 - 3	< 1	-
Eficácia da Valeta de Plataforma	Boa retenção	Moderada retenção	Retenção limitada	Retenção muito limitada
Zona de Influência	Longe	Média	Perto	Muito perto
Largura da Plataforma (m)	21,5	15,5	9,5	3,5
Condição Estrutural	Descontinuidades com orientação favorável	Descontinuidades com orientação aleatória	Descontinuidades com orientação desfavorável	Descontinuidades muito contínuas com orientação desfavorável
Alteração do Maciço	W1	W2 - W3	W3 - W4	W5
Erosão	Pequena	Moderada retenção	Elevada	Extrema
Tamanho dos Blocos (m)	0,3	0,6	0,9	1,2
Volume de Blocos por Evento (m3)	2,3	4,6	6,9	9,3
Quantidade dos Blocos	Nenhuns	Pouco	Alguns	Muitos
Irregularidade da Face	Baixa	Média	Alta	Muito alta
Presença de Água	Seco	Húmido	Gotejante	Fluído
Historial de Queda de Blocos	Poucas quedas	Quedas ocasionais	Muitas quedas	Quedas constantes
AVR	1/10 anos	3/ano	6/ano	9/ano
	25%	50%	75%	100%
Distância de Decisão	Adequada	Moderada	Limitada	Muito limitada
	100%	80%	60%	40%
Clima	Baixa precipitação	Moderada precipitação	Alta precipitação	-
	< 1000	1000 - 2000	> 2000	-

Quadro 22. Resumo da classificação do sistema RHRSm2 e respetiva conversão para o índice geral do talude (adaptado de Pierson et al., 1990; Budetta, 2004).

Classificação Geral do Talude			Índice Geral
Pontuação RHRS (adaptado)	Grau de Risco	Intervenção	
< 54	Muito Baixo	-	1
54 – 162	Baixo	Médio Prazo	2
163 – 324	Médio	Curto Prazo	3
325 – 486	Elevado	Urgente	4
> 487	Muito Elevado	Imediata	5

3.5.4. Slope Quality Index (SQI, versão 2015)

O sistema de classificação SQI de Pinheiro et al. (2015) surge na sequência do anterior sistema RHRS (*Rockfall Hazard Rating System*) de Pierson et al. (1990). Assim pode afirmar-se que o sistema SQI responde globalmente às necessidades e opções de carácter estratégico das empresas concessionárias de infraestruturas que lidam com taludes a fim de avaliar os mesmos e prever possíveis comportamentos mecânicos, visando dessa forma a segurança de todos os utilizadores.

O sistema *Slope Quality Index* – SQI proposto por Pinheiro et al. (2015), recorre ao sistema empírico proposto por Liu & Chen (2007), cuja finalidade passa por integrar fatores que de alguma forma estão ligados à estabilidade dos taludes, ou seja, que influenciam de forma direta ou indireta o seu comportamento mecânico.

O SQI (Pinheiro et al., 2015) passa por determinar um índice de qualidade final, com uma cotação entre 1 e 5 (Figura 19), onde representa muito boa ou muito má condição do talude, respetivamente (quadro 23). Para que se possa obter este índice de qualidade serão avaliados vários parâmetros e cujas cotações a serem atribuídas a cada um deles é também variável entre 1 e 5. Os fatores que influenciam esta análise e avaliação de qualidade do talude já foram apresentados anteriormente no quadro 22, sendo aos mesmos atribuídos pesos ponderados por grau de importância.

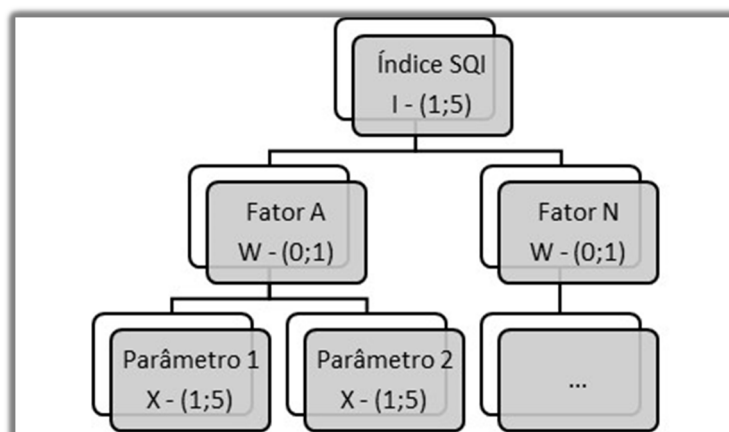


Figura 19. Metodologia para obtenção do SQI (adaptado de Pinheiro et al., 2015).

Quadro 23. Classificação quantitativa e qualitativa do talude bem como o seu grau de risco associado função do valor de SQI (Pinheiro et al., 2015).

SQI	Estado do Talude	Grau de Risco
1 – 1,4	Muito Bom	Muito Baixo
1,5 – 2,4	Bom	Baixo
2,5 – 3,4	Médio	Médio
3,5 – 4,2	Mau	Alto
4,3 - 5	Muito Mau	Muito Alto

O cálculo do índice *Slope Quality Index* deve ser então obtido com a aplicação da seguinte expressão (Pinheiro et al., 2015):

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \times X_i$$

Em relação à cotação atribuída a cada um dos fatores a ter em conta, esta poderá ser calculada individualmente com recurso à expressão seguinte (Pinheiro et al., 2015):

$$X_i = \sum_{i=1}^n W'_i \times X'_i$$

Onde:

- **SQI** – representa o índice de qualidade do talude;
- **W_i** – representa o peso calculado para cada um dos 9 fatores;
- **X_i** – representa a cotação atribuída a cada um dos 9 fatores (será maior quanto maior a importância do mesmo na análise da avaliação de risco);
- **W_i'** – representa o peso atribuído a cada parâmetro;
- **X_i'** – representa a cotação a atribuir a cada parâmetro.

No quadro 24 apresentam-se os fatores, já referidos anteriormente, a considerar nesta classificação, bem como os respetivos pesos finais associados.

Quadro 24. Peso associado a cada fator para o cálculo do SQI (adaptado de Pinheiro et al.,2015)

FATOR	PESO
Geometria	0,17
Geológico	0,14
Sistema de drenagem	0,11
Inspeções	0,13
Monitorização	0,11
Imediações	0,09
Historial	0,07
Revestimento	0,10
Ambiental/Tráfego	0,08

Segundo Pinheiro et al. (2015), para a eventual falta de dados em relação a alguns dos anteriores parâmetros apresentados, deve assumir-se que o peso relativo aos mesmos deverá ser distribuído pelos restantes fatores, de forma proporcional aos pesos atribuídos inicialmente, por ordem de importância na avaliação do talude. No quadro 25 é apresentado o método de atribuição da classificação SQI.

Quadro 25. Atribuição de fatores para a determinação do SQI (adaptado de Pinheiro et al, 2015).

Fatores	Parâmetros	Categorias e Classificações						
Geométrico 0,17	Altura do Talude (m) 0,25	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	> 40		
	Peso	1	2	3	4	5		
	Inclinação do Talude (°) 0,35	< 30	30 - 40	41 - 50	51 - 60	> 60		
	Peso	1	2	3	4	5		
	Ângulo de Banqueta (m) 0,15	Correto	Incorreto					
	Peso	1 - 2	4 - 5					
	Largura da Banqueta (m) 0,25	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 4	> 4		
Peso	5	4	3	2	1			
Geológico 0,14	Formação 0,5	Tipo 0,4	I	II	III	IV	V	
		Peso	1	2	3	4	5	
		Grau de Alteração (W) 0,3	W1	W2	W3	W4	W5	
		Peso	1	2	3	4	5	
		Falhas 0,3	Existe					
	Peso	4 - 5						
	Blocos 0,2	RHRSm2	< 51	51 - 153	153 - 333	333 - 459	> 459	
		Peso	1	2	3	4	5	
	Sistema de Classificação (apenas 1) 0,3	Q 0,33	40 - 1000	10 - 40	4 - 10	1 - 4	0,001 - 1	
		Peso	1	2	3	4	5	
		RMR 0,34	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0	
		Peso	1	2	3	4	5	
		SMR 0,33	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0	
Peso	1	2	3	4	5			
Sistema de Drenagem 0,11	Drenagem superficial 0,6	Estado de Conservação 0,35	Muito Bom	Bom	Médio	Mau	Muito Mau	
		Peso	1	2	3	4	5	
		Estado de Manutenção 0,45	Bom	Médio	Mau			
		Peso	1	2	3			
		Presença 0,2	Sim	Não				
	Peso	1 - 2	4 - 5					
	Drenagem Profunda 0,2	Presença 1	Sim	Não				
		Peso	1 - 2	4 - 5				
	Drenagem das Banquetas 0,2	Presença	Sim	Não				
Peso		1 - 2	4 - 5					

Quadro 25. (Continuação).

Fatores	Parâmetros		Categorias e Classificações				
Inspeção Visual 0,13	Estado de Conservação 0,6	Classificação	Muito Bom	Bom	Médio	Mau	Muito Mau
		Peso	1	2	3	4	5
	Estado de Manutenção 0,4	Classificação	Bom	Médio	Mau		
		Peso	1	2	3		
Monitorização 0,11	Células de Carga 0,25	Intervalos	1	2	3	4	5
			[0% - 20%[	[20% - 40%[	[40% - 60%[	[60% - 80%[	[80% - 100%[
		Peso	1	2	3	4	5
	Inclinómetros 0,25	Intervalos	1	2	3	4	5
			[0% - 20%[	[20% - 40%[	[40% - 60%[	[60% - 80%[	[80% - 100%[
		Peso	1	2	3	4	5
	Piezómetros 0,25	Intervalos	1	2	3	4	5
			[0% - 20%[	[20% - 40%[	[40% - 60%[	[60% - 80%[	[80% - 100%[
		Peso	1	2	3	4	5
	Alvos Topográficos 0,25	Intervalos	1	2	3	4	5
			[0% - 20%[	[20% - 40%[	[40% - 60%[	[60% - 80%[	[80% - 100%[
		Peso	1	2	3	4	5
Historial 0,07	Acidentes 0,7	Queda de Blocos 0,25	Nenhuma	Inativa	Alguma	Relativamente Ativa	Muito Ativa
		Peso	1	2	3	4	5
		Deslizamento Planar 0,25	Nenhuma	Inativa	Alguma	Relativamente Ativa	Muito Ativa
		Peso	1	2	3	4	5
		Cunha de Rocha 0,25	Nenhuma	Inativa	Alguma	Relativamente Ativa	Muito Ativa
		Peso	1	2	3	4	5
		Diretriz Circular 0,25	Nenhuma	Inativa	Alguma	Relativamente Ativa	Muito Ativa
	Peso	1	2	3	4	5	
	Intervenções		Grau 3	Grau 2	Grau 1		
	Peso		1 - 2	3	4 - 5		
Ambiental / Tráfego 0,08	Zona Sísmica 0,3	Tipo 2 0,6	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
		Peso	5	4	3	2	1
		Tipo 1 0,4	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5 - 1.6
		Peso	5	4	3	2	1
	Precipitação Média Anual (mm) 0,5		< 100	100 - 500	500 - 1000	1000 - 2000	> 2000
	Peso		1	2	3	4	5
	Tráfego 0,2	Velocidade Máxima (km/h) 0,5	50 - 60	60 - 70	70 - 90	90 - 100	100 - 120
		Peso	1	2	3	4	5
		Tráfego Médio (TMD) 0,5	< 1800	1800 - 1900	1900 - 2000	2000 - 2200	> 2200
		Peso	1	2	3	4	5

Quadro 25. (Continuação).

Fatores	Parâmetros	Categorias e Classificações				
Proteção 0,1	Proteção Superficial 0,8	< 25%	[25% - 50%[	50%	]50% - 75%]	]75% - 100%]
	Peso	5	4	3	2	1
	Cobertura Vegetal 0,2	Não Existe	Pontual	Uniforme		
	Peso	5	4 - 5	1 - 2		
Imediações 0,09	Sobrecarga 0,6	Sim	Não			
	Peso	5	1			
	Vibrações nas Proximidades 0,4	Sim	Não			
	Peso	5	1			

Após ser efetuado o cálculo do SQI (Pinheiro et al., 2015), o valor numérico obtido deverá ser comparado com o quadro anteriormente apresentado, correspondente à avaliação do grau de risco SQI (ver Quadro 23) e, à semelhança do que acontece habitualmente com este tipo de métodos de classificação, verificar em que intervalo se encaixa o valor obtido e retirar as respetivas conclusões para o talude avaliado, seja na verificação do seu estado, seja na referida avaliação de risco.

3.6. Modelação Geotécnica de Taludes: RocFall

O “Rocfall version 5” (RocScience)² é um programa informático de análise estatística cuja finalidade se prende com a possibilidade de simular a trajetória dos blocos rochosos que se encontrem no estado de instabilidade num dado talude rochoso. A análise deste programa informático é efetuada a duas dimensões (figura 20).

² Na redação deste breve tópico de modelação geotécnica de taludes rochosos seguiu-se de perto os tutoriais do programa RocFall (<https://www.rocscience.com/rocscience/products/rocfall/resources/tutorials>) da RocScience (<https://www.rocscience.com/>).

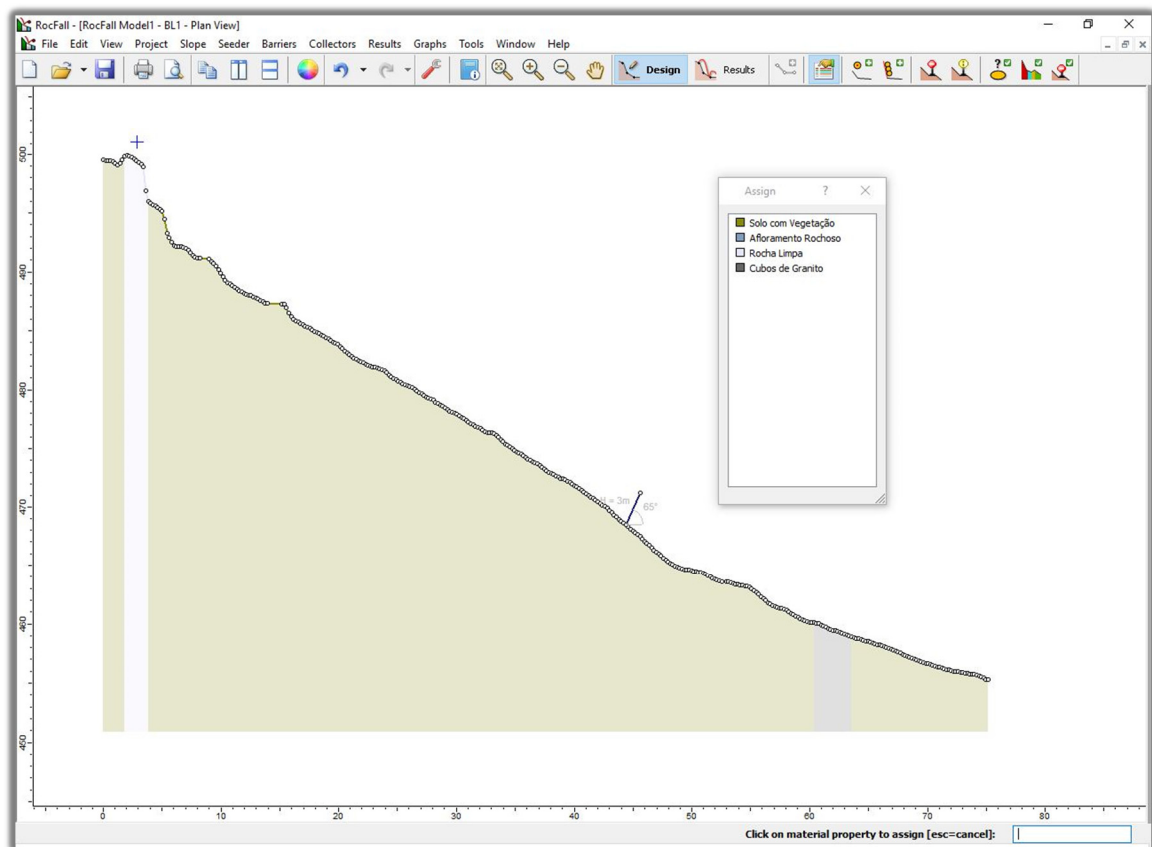


Figura 20. Ilustração genérica do Rocfall 5.0 (RocScience – <https://www.rocscience.com/>).

Para que se dê início à utilização deste programa, é necessário definir-se, em perfil, as coordenadas do talude bem como as suas características em função das exigências do programa, sendo também possível selecionar vários materiais com diferentes propriedades.

Os parâmetros de entrada no programa, alusivos aos materiais anteriormente referidos, são referentes a três características específicas, sendo elas o coeficiente de restituição (normal e tangencial), o ângulo de atrito e o desvio padrão da rugosidade (figura 21).

A etapa seguinte passa por definir as condições iniciais das rochas a analisar, sendo apenas dessa forma possível completar o modelo de simulação de trajetórias dos blocos. As condições iniciais das rochas são as seguintes: a) Localização; b) Número; c) Massa; d) Velocidade inicial (horizontal e vertical).

Após a introdução destes componentes já se poderá verificar e analisar os resultados, com recurso a vários tipos de gráficos, sendo eles: 1) Localização horizontal do ponto de chegada das rochas; 2) Energia cinética (translacional, rotativa e total); 3) Velocidade de deslocação; 4) Altura do salto do bloco.

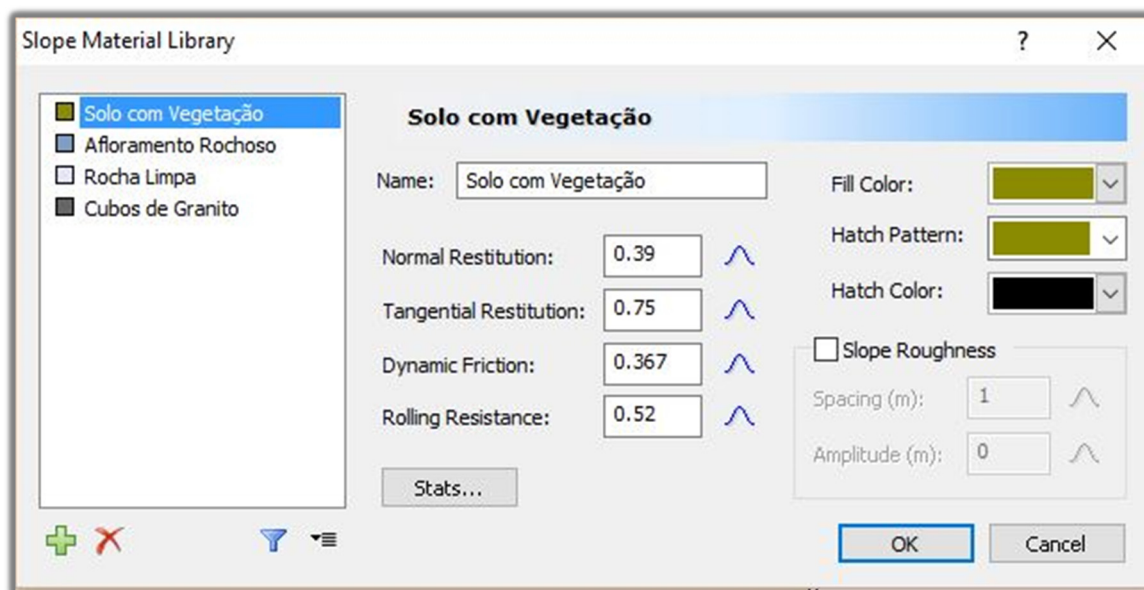


Figura 21. Caracterização dos diferentes materiais de acordo com as características específicas: coeficiente de restituição (normal e tangencial), coeficiente de atrito dinâmico e coeficiente de resistência ao rolamento (RocScience – <https://www.rocscience.com/>).

Este programa permite ainda a visualização de todos os gráficos possíveis de serem gerados automaticamente, em simultâneo, permitindo dessa forma um outro tipo de análise. Podendo ainda, alterar a qualquer momento, as propriedades dos materiais introduzidas inicialmente, o que permite também verificar e testar com outra sensibilidade os resultados finais obtidos.

Outra das possibilidades deste programa é a simulação e modelação de barreiras de proteção, sendo dessa forma uma excelente ferramenta para iniciar e concluir trabalhos de estudo referentes a risco de quedas de taludes rochosos com um único programa informático. A modelação das barreiras de proteção permite que estas sejam colocadas em qualquer ponto ao longo do talude, dando uma grande versatilidade de ensaios a uma possível solução final.

Para a introdução de dados referentes às barreiras de proteção existem dados fundamentais que se deverão conhecer, todos eles referentes às barreiras, a saber:

- i. Barreiras perfeitamente elásticas: coeficiente de restituição = 1;
- ii. Barreiras perfeitamente não elásticas: coeficiente de restituição = 0;
- iii. Personalizadas: coeficiente de restituição compreendido entre 0 e 1.

Em relação à capacidade resistente das barreiras de proteção, é possível introduzir valores que correspondam à capacidade que se pretenda que a mesma apresente, sendo de imediato avaliado pelo programa se essa capacidade vai de encontro às necessidades do talude. Um dos requisitos a ter em conta é o facto de as barreiras de proteção, devidamente dimensionadas, terem a

capacidade resistente de reter blocos em queda provenientes de cotas superiores, evitando dessa forma que, devido aos ressaltos, as mesmas transponham a estrutura, deixando esta de cumprir a sua função.

Ainda relativo ao programa *“Rocfall”*, quando as rochas soltas atingem a barreira, podem ser visualizados alguns gráficos relativos ao impacto, sendo os mesmos os seguintes:

- i. Gráfico de energia cinética (translacional, rotacional e total);
- ii. Gráfico de velocidade rotacional;
- iii. Localização da zona de impacto na barreira: X ou Y (horizontal ou vertical, respetivamente).

Os resultados relativos à energia cinética e à localização da zona de impacto numa determinada barreira ajudam a que seja possível definir, com maior rigor, dados intrínsecos da mesma, ou seja, dados sobre a sua resistência, tamanho e localização, fazendo com que, posteriormente, os dados possam ser alterados no programa e testada uma nova simulação a fim de verificar finalmente as características referidas como sendo as mais apropriadas para aquele caso específico.

Em relação ao *“Rocfall”* não existe qualquer restrição quanto ao número de recetores de dados a serem utilizados, uma vez que estes não influenciam o movimento dos blocos e não apresentam qualquer tipo de propriedades. Este programa disponibiliza também, uma opção de filtragem que permite a visualização da informação estatística obtida, bem como de gráficos de distribuição referente apenas às trajetórias selecionadas.

(Página propositadamente em branco)

4

Estabilidade da Vertente Rochosa de S. Simão (Amarante): Geotecnia e Geomecânica

(Página propositadamente em branco)

4. Estabilidade da Vertente Rochosa de S. Simão (Amarante): Geotecnia e Geomecânica

4.1. Descrição Geral da Área de S. Simão (Amarante)

A cidade de Amarante pertence ao distrito do Porto que se situa na região norte de Portugal e na sub-região do rio Tâmega (figura 22), sendo considerada uma das cidades de Portugal com mais história e simbolismo. Os especialistas apontam duas hipóteses para a designação do nome “Amarante” à cidade, sendo que a primeira teoria consta que o conselho se denominaria por “Villa Amaranthi”, que poderá ser traduzido por “Quinta de Amaranto”, e que Amaranto teria sido um importante chefe romano. A segunda versão, por seu turno, refere que Amarante deriva de “Admaranus” que significa “junto ao Marão” (pormenores em Vieira & Pinto, 2013).

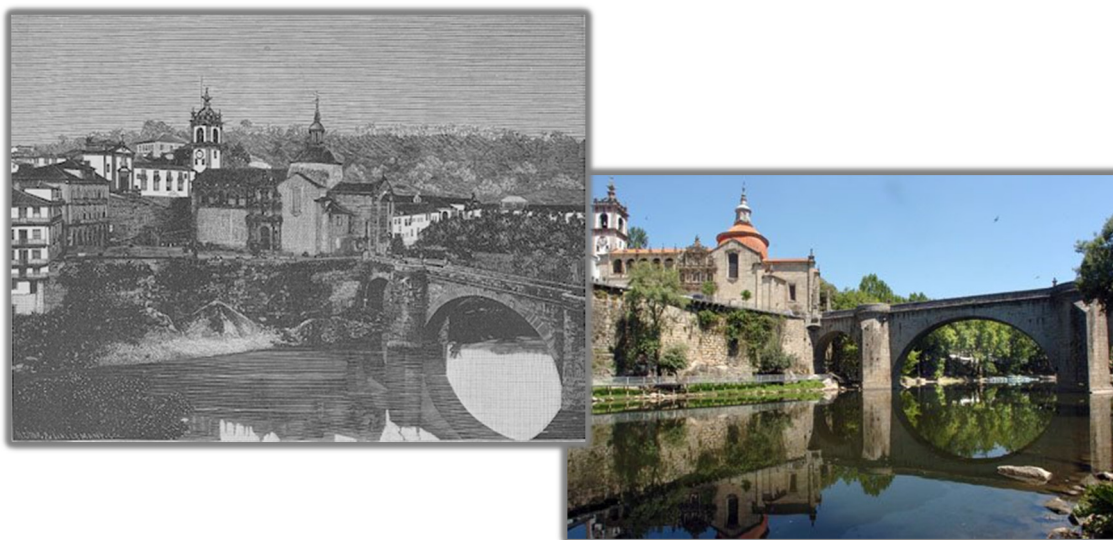


Figura 22. Estampa ilustrativa da beleza ímpar de Amarante com o seu Mosteiro e ponte de São Gonçalo sobre o rio Tâmega (imagem do lado esquerdo: Vieira & Pinto, 2013; imagem do lado direito: http://www.lazer.publico.pt/monumentos/6453_convento-de-sao-goncalo-de-amarante).

Neste capítulo será feita uma breve síntese dos enquadramentos geográficos, geológico, geomorfológico e hidroclimatológico que, em parte, condicionam a estabilidade da vertente rochosa de S. Simão, o alvo deste estudo.

4.2. Enquadramento Regional: Geográfico, Geológico e Geomorfológico

4.2.1. Enquadramento Geográfico

A vertente de S. Simão localiza-se na freguesia de Gouveia (S. Simão), no concelho de Amarante, no Distrito do Porto (figura 23). O concelho de Amarante é constituído por 26 freguesias, tendo uma superfície total de 301,3 km². O município é limitado a Norte por Celorico de Basto, a Nordeste por Mondim de Basto, a Noroeste por Felgueiras, a Este por Vila Real e por Santa Marta de Penaguião, a Oeste por Lousada e a Sul por Baião, Marco de Canaveses e Penafiel. A freguesia de Gouveia (S. Simão) apresenta uma área de 12,5 km² e uma população de 633 habitantes (INE, 2011), o que se traduz por uma densidade populacional baixa (ca. 50 hab/km²).

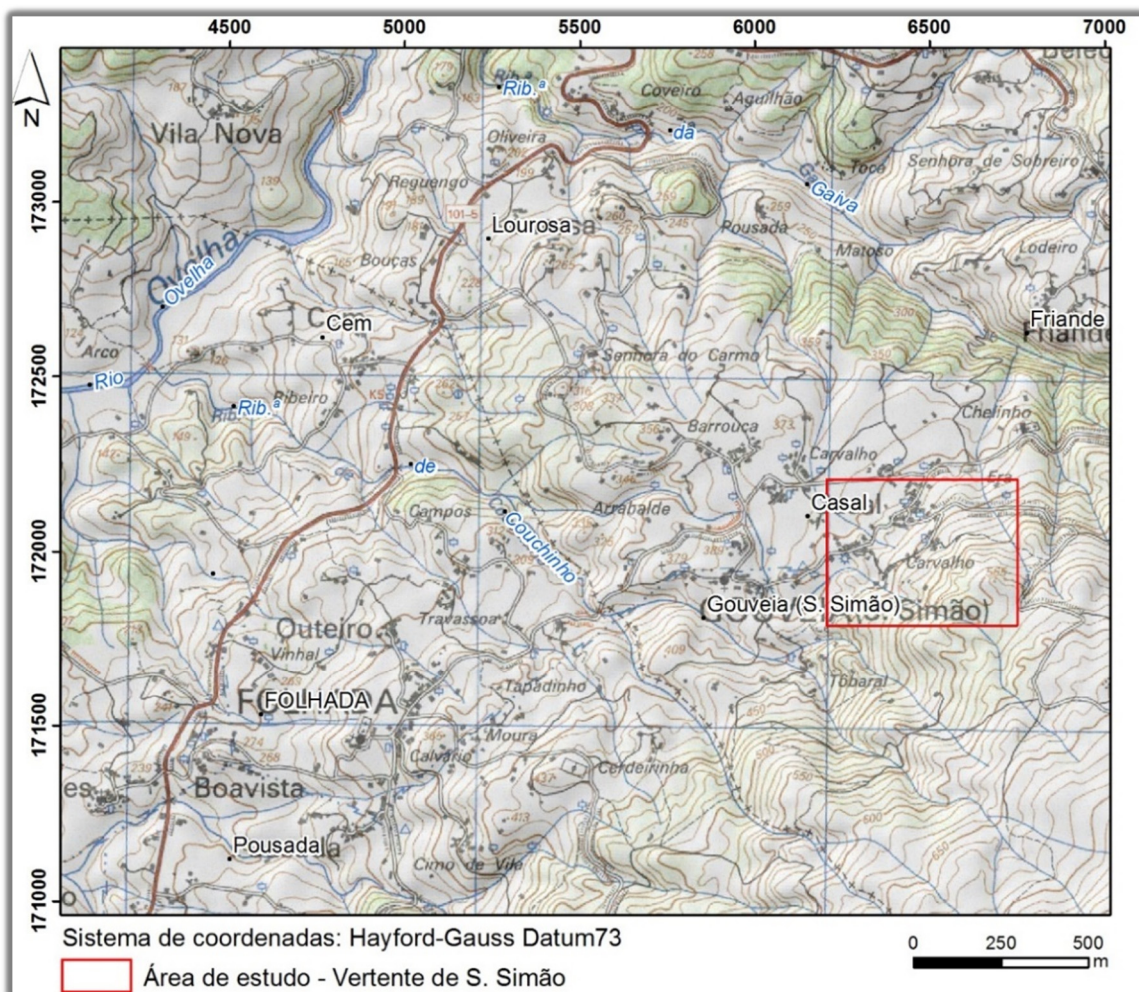


Figura 23. Localização geográfica da área de Gouveia (S. Simão, Amarante).

A área em estudo caracteriza-se pela existência de um grande contraste em termos de altitude, a qual pode variar entre os 350 m no lugar da Aldeia Velha no sopé da vertente de S. Simão, e os 565 m no topo da vertente de S. Simão.

Na figura 24 podem ser observados vários aspetos da vertente rochosa, nomeadamente: a presença de blocos de grandes dimensões, em condições de elevada instabilidade, os declives acentuados desde o topo da vertente até à sua base e uma vista geral da área em estudo, donde se destacam as habitações no sopé da vertente.



Figura 24. Aspetos gerais da vertente rochosa de S. Simão: a e b – blocos instáveis; c e d – inclinação geral da vertente; e – vista panorâmica da vertente e as habitações no sopé da vertente.

No que concerne à distribuição dos declives na área em estudo (figura 25) pode observar-se que predominam os declives acentuados, superiores a 40%, ainda que a NW se possam observar declives menos acentuados, entre os 5% e os 10%. Estes declives acentuados não permitem a instalação de atividades antrópicas, contrastando com a área aplanada a NW, na qual se pode observar a presença das populações.

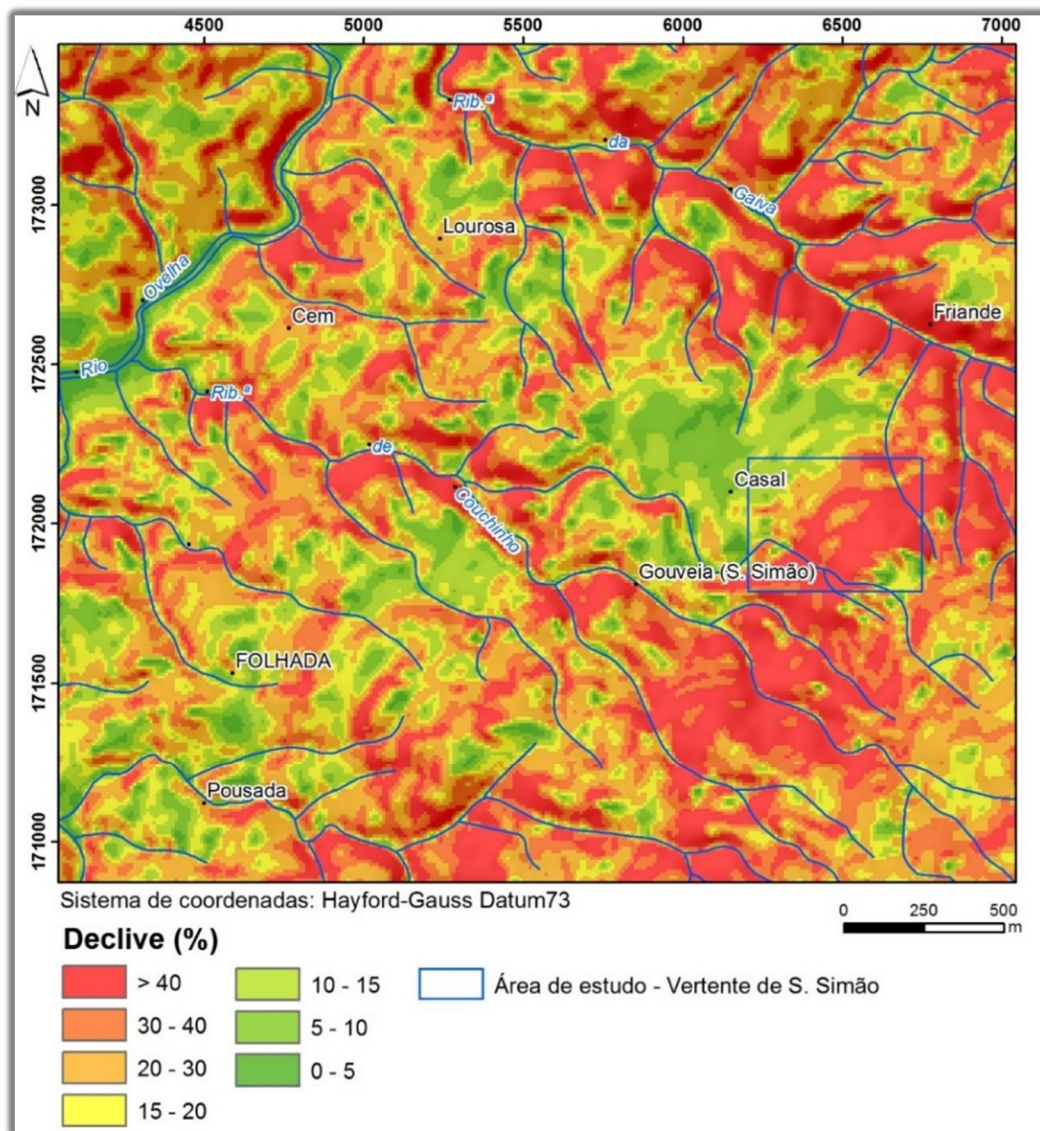


Figura 25. Mapa de declives da área de Gouveia (S. Simão, Amarante).

4.2.2. Enquadramento Geológico

A área de S. Simão enquadra-se, em termos geológicos, numa grande mancha granítica, que se estende desde Penafiel a Amarante, e desde Lousada a Resende (*e.g.*, Ferreira et al., 1987; Pereira et al., 1989; Oliveira et al., 1992). Esta corresponde a um maciço orientado de forma alongada na direção NW-SE e possui texturas mais ou menos orientadas, em que a foliação é marcada por megacristais de feldspato potássico e/ou pela biotite (Pereira et al., 1989). As rochas graníticas presentes na área de estudo fazem parte de uma faixa de granitóides Variscos, com orientação geral NW-SE, que se estendem desde o Alto Minho até às Beiras. Do ponto de vista geotectónico a região insere-se na Zona Centro-Ibérica (ZCI) do Maciço Ibérico (Ferreira et al., 1987; Ribeiro et al., 2007). Cerca de 96 % da área corresponde a este tipo de rochas, das quais se fará seguidamente uma descrição sucinta (pormenores em Teixeira et al., 1967; Pereira et al., 1989).

O granito porfiróide de grão grosseiro, essencialmente biotítico (granito de Amarante) corresponde a uma mancha que representa o sector terminal da extensão para SE de extensos maciços que têm maior representação na região do Minho (Ponte da Barca, Vieira do Minho, Guimarães). Correspondem a monzogranitos muito ricos em feldspato potássico, porfiróides, de grão grosseiro, essencialmente biotíticos contendo raros encraves microgranulares.

Esta unidade geológica do granito porfiróide de grão grosseiro domina praticamente toda a área de estudo, apenas sendo interrompida por um pequeno filão aplito-pegmatítico e por uma pequena mancha de aluviões, no fundo do vale do rio Ovelha (figura 26). Caracteriza-se por ter horizontes de alteração em geral muito espessos, que podem atingir por vezes os 10 a 20m, sendo constituídos por materiais arenosos (resultantes da meteorização mecânica, por desagregação do quartzo) e argilosos (resultantes sobretudo da alteração meteórica dos feldspatos).

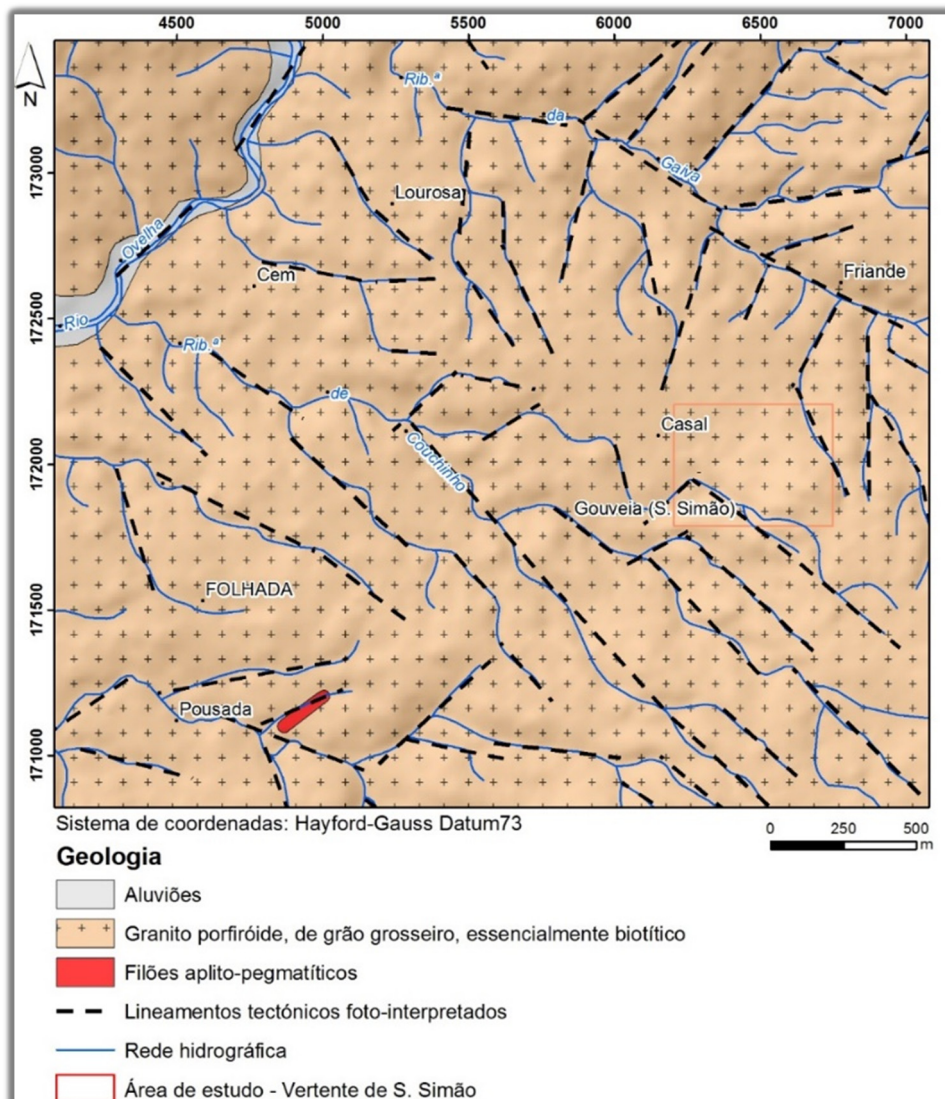


Figura 26. Enquadramento geológico da área de Gouveia (S. Simão, Amarante), (adaptado e revisto de Teixeira et al., 1967).

O contexto geológico-estrutural da região em estudo é dominado por uma rede de estruturas em grande (falhas regionais e fracturação associada) que sugerem controlar as formas de relevo. O sistema de fracturação que ocorre segundo as direcções NNE-SSW a NE-SW é bastante representativo nesta área, sendo, nas direcções mais próximas a NNE-SSW, paralelo à megaestrutura regional “falha Verin-Régua-Penacova” e nas direcções mais aproximadas de NE-SW paralelo à “falha do Tâmega”, esta última bem representada entre Amarante e Entre-os-Rios (Cabral & Ribeiro, 1988; Pereira et al., 1993). Estas estruturas condicionam a instalação de alguns dos cursos de água, nomeadamente o Rio Ovelha, e alguns cursos de água de menor dimensão. Este sistema condiciona também a forma alongada da área aplanada nas proximidades da localidade de Casal, conforme se verá no ponto seguinte. A par deste sistema, surge um outro, de direcção aproximada NW-SE, direcção que se aparenta à da megaestrutura regional Vigo-Régua (Ferreira et al., 1987). Este sistema de estruturas condiciona alguns dos troços dos afluentes principais do Rio Ovelha. A sua intersecção com o sistema NNE-SSW a NE-SW resulta num traçado da rede hidrográfica pautado por mudanças bruscas de direcção, por vezes em ângulos aproximadamente retos.

Conforme foi referido anteriormente, o aproveitamento da rede de falhas (e fraturas associadas) para instalação dos cursos de água não é tão evidente no sistema mais discreto com orientação aproximada NNE-SSW a N-S, apesar de a grande continuidade de alguns dos lineamentos tectónicos identificados. Os lineamentos com direcção aproximada E-W apresentam, em geral, pouca continuidade, e uma importância relativamente baixa na definição das formas de relevo e instalação da rede hidrográfica.

4.2.3. Enquadramento Geomorfológico

A morfologia da área de S. Simão é dominada pela geometria dos lineamentos tectónicos que serão os principais responsáveis pelo arranjo regional do relevo nesta área. Destaca-se um conjunto de estruturas geológicas com direcções NE-SW e NW-SE, que individualizam uma série de blocos aplanados, escalonados a diferentes altitudes.

A disposição destes blocos escalonados evidencia um entalhe quase exclusivo pela rede hidrográfica secundária, a qual corresponde nalguns casos a vales de fratura alinhados, típicos do modelado granítico (O. Ribeiro et al., 1987a). Tal como noutras regiões graníticas do Norte de Portugal a morfologia desta área é marcada pela conservação de superfícies de aplanamento, separadas por vertentes abruptas, quer se trate de flancos das elevações quer das vertentes dos vales. Por isso, os cursos de água apresentam um traçado geométrico que resulta da sua adaptação

a corredores de esmagamento materializados por falhas geológicas regionais (Brum Ferreira, 1978, 1979).

Na área de S. Simão (figura 27) merecem ainda destaque, em termos morfológicos, a continuidade das vertentes, bem como o seu declive. Na área de estudo (vertente de S. Simão) verifica-se a existência de vertentes abruptas, que ligam superfícies aplanadas, com diferenças de cota superiores a 500 m entre si. Além deste aspeto, a grande área aplanada, com cotas entre 300 e 400 m, surge separada de uma outra, a NE, com cotas entre 400 e 500 m, separação esta feita por um lineamento de direção aproximada WNW-ESE, o que sugere que este pode corresponder a uma falha, com componente de movimentação vertical, que terá desnivelado os dois blocos em questão.

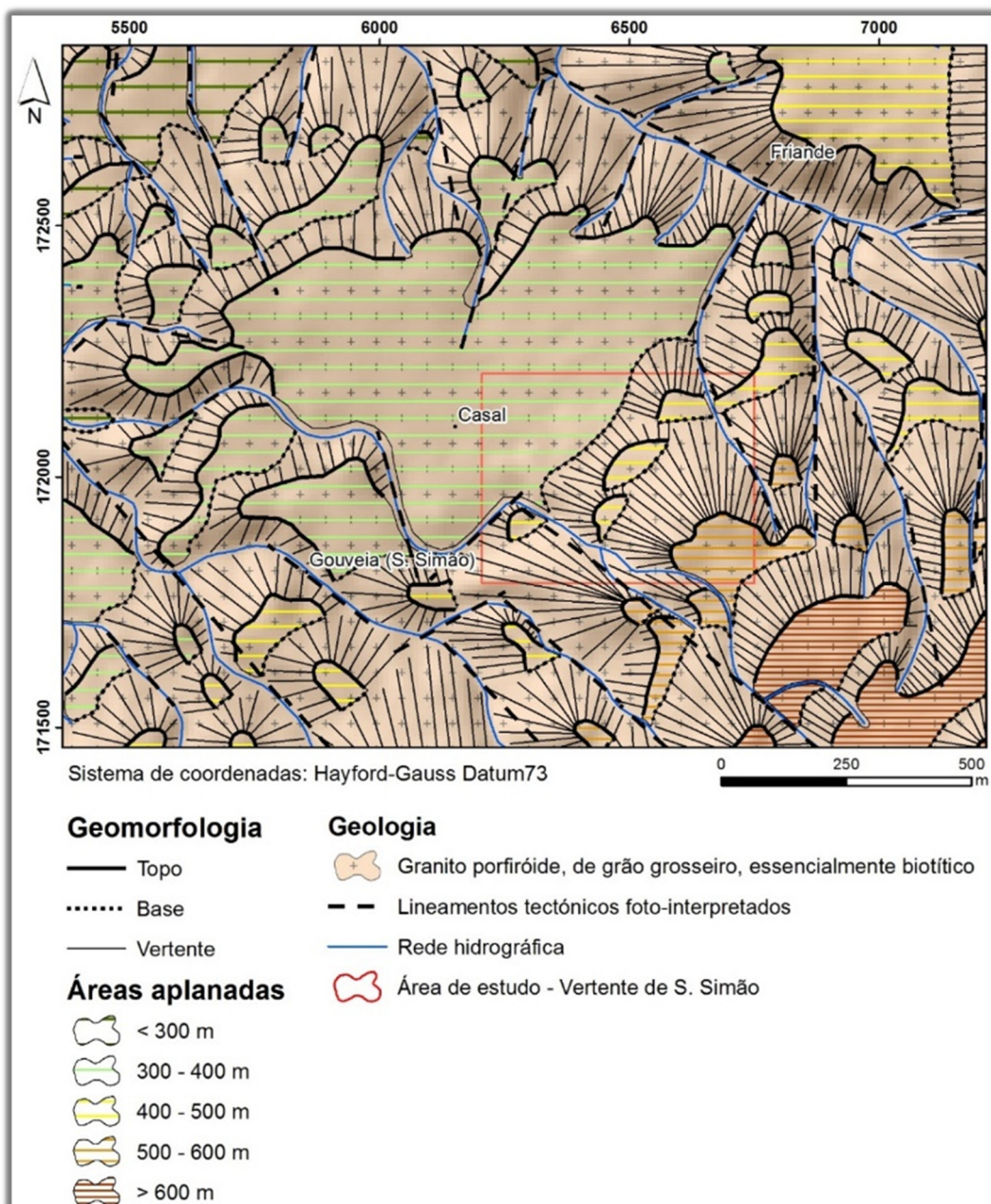


Figura 27. Enquadramento geomorfológico da área de Gouveia (S. Simão, Amarante).

4.3. Tectonossismicidade

De acordo com o Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAEEP, in: Brazão Farinha et al., 2006), a área de S. Simão encontra-se na Zona D (tal como todo o Norte de Portugal). Esta é considerada a zona com menor risco sísmico e, como tal, aquela em que as medidas a tomar, nomeadamente na construção anti-sísmica serão menos restritivas. Por seu turno, o zonamento sísmico em Portugal, segundo o Eurocódigo 8 (NP EN-1998-1, 2010), posiciona o município de Amarante na zona sísmica 1.6 (Ação Sísmica Tipo I) e na zona sísmica 2.5 (Ação Sísmica Tipo II), às quais correspondem, respetivamente, valores de aceleração máxima de referência (a_{gR}) de $0,35 \text{ m/s}^2$ e $0,8 \text{ m/s}^2$.

A figura 28A representa zonas de intensidade máxima (escala internacional), com os dados sísmicos de 1901-1972 (Atlas do Ambiente, 1991). Verifica-se que a área de S. Simão apresenta um valor de intensidade máximo de VI. Na figura 28B representam-se as isossistas de intensidades máximas, escala de Mercalli Modificada de 1956, com dados de 1755-1996. Verifica-se também que a intensidade máxima registada na área corresponde a VI, integrando-se no conjunto de valores de intensidade moderada.

Uma vez que a instabilidade dos blocos na vertente de S. Simão poderia ser afetada por vibrações resultantes de um sismo, procurou-se recolher toda a informação histórica, para os meses de Julho e Agosto de 2004, atendendo ao registo histórico da queda de um bloco que atingiu uma habitação nesta altura.

A figura 28C apresenta a compilação de sismos ocorridos na envolvente da área de S. Simão, nos meses de Julho e Agosto de 2004. Nesta data foram apenas registados 3 sismos, com magnitudes inferiores a 1,1, segundo dados do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). Estes parecem estar ligados à já referida Falha do Tâmega, no caso dos sismos ocorridos próximo às localidades de Ribeira de Pena e de Mondim de Basto, bem como à Falha Verín-Régua-Penacova, no caso do sismo registado próximo à cidade de Peso da Régua.

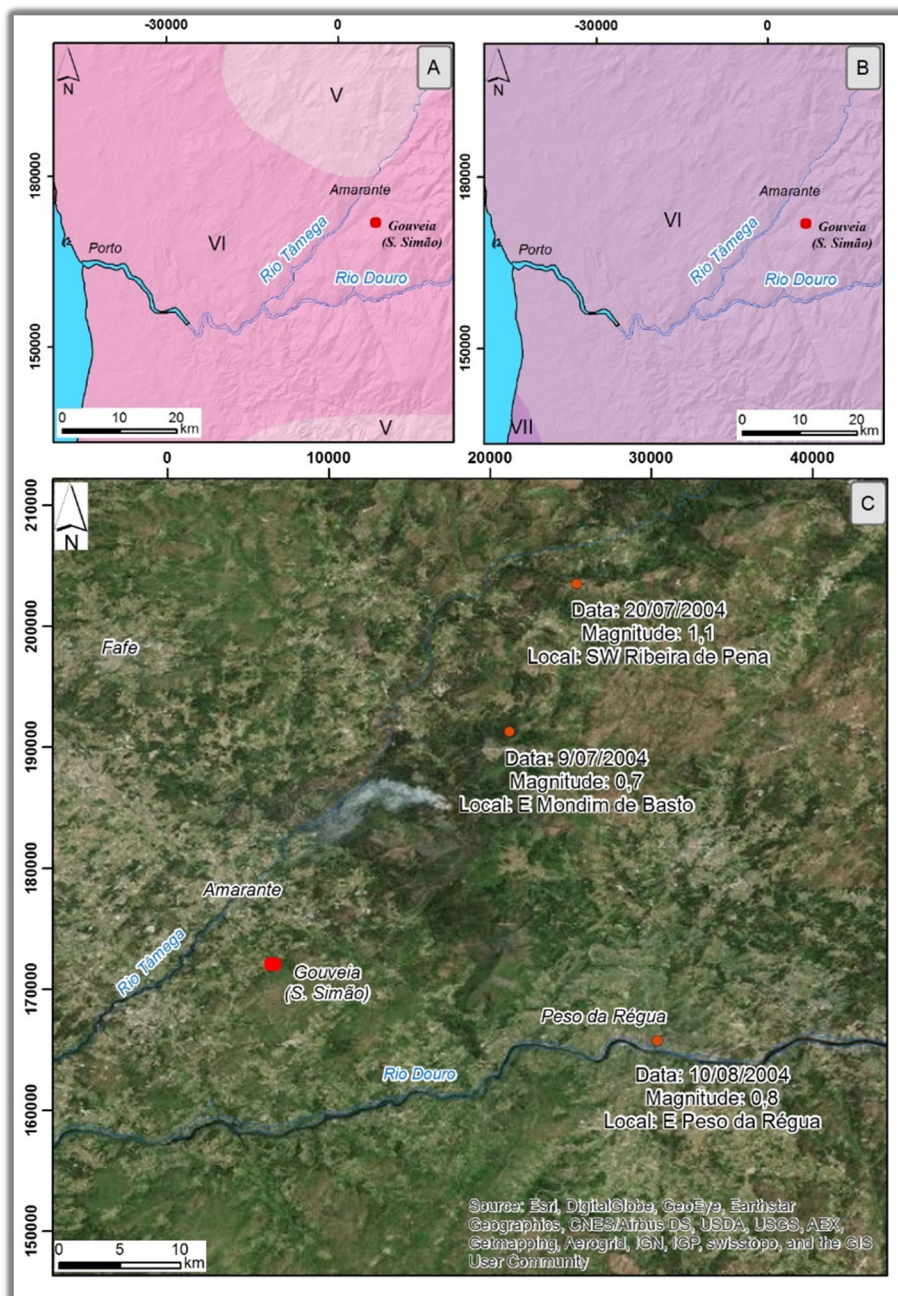


Figura 28. Sismicidade da área de S. Simão: A - zonas de intensidade máxima (escala internacional); B - Isoassistas de intensidades máximas, escala de Mercalli Modificada de 1956; C – Sismos ocorridos na região, em Julho e Agosto de 2004 (IPMA).

4.4. Hidroclimatologia

Portugal Continental apresenta características climáticas próprias, distinguindo-se claramente das restantes regiões europeias. A peculiaridade do seu clima prende-se, basicamente, com a posição marginal do continente português relativamente ao Oceano Atlântico, numa latitude subtropical (O. Ribeiro et al., 1987a,b). A precipitação, no Norte de Portugal, começa por aumentar do litoral

para o interior, devido à existência de barreiras orográficas, diminuindo, por sua vez, à medida que se penetra na periferia da região central da Península Ibérica.

De acordo com Daveau (1985), a região na qual se enquadra S. Simão é caracterizada por Invernos frescos e Verões moderados, ou seja, a temperatura mínima média do mês mais frio está compreendida entre 2°C e 4°C, verificando-se entre 10-30 dias/ano com temperaturas negativas e a temperatura máxima média do mês mais quente está compreendida entre 23°C e 29°C, registando-se 20-100 dias/ano com temperaturas máximas superiores a 25°C.

Segundo a classificação de Köppen, a área de estudo apresenta um clima de tipo Csb (Peel et al., 2007), ou seja:

- Clima mesotérmico (temperado) húmido, em que a temperatura do mês mais frio é inferior a 18°C, mas superior a - 3°C, enquanto o mês mais quente apresenta valores superiores a 10°C;
- Estação seca no Verão, em que a quantidade de precipitação do mês mais seco do semestre quente é inferior a 1/3 da do mês mais chuvoso do semestre frio e inferior a 40 mm;
- Verão pouco quente mas extenso, em que a temperatura média do ar no mês mais quente do ano é inferior a 22°C, havendo mais de quatro meses cuja temperatura média é superior a 10°C.

Na figura 29 apresenta-se um gráfico com os valores médios de precipitação mensal da estação de Amarante. Estes refletem claramente o padrão já referido, nomeadamente quanto aos regimes de precipitação, sobretudo no mês mais seco. Verifica-se que a precipitação média para os meses de Julho e Agosto ronda os 10-25 mm, em contraste com o mês de Dezembro, em que os valores de precipitação se aproximam dos 200 mm.

No entanto, e para se perceber se o regime pluviométrico estava, de alguma maneira, relacionado com o incidente ocorrido no Verão de 2004, representaram-se igualmente no mesmo gráfico as precipitações mensais nesse ano. Ressalta claramente o valor anormal registado no mês de Agosto, 100 mm, o qual corresponde a cerca de 5 vezes a precipitação média deste mês.

Numa análise mais fina ao regime de precipitação, procurou-se obter o registo diário da precipitação, para este local. No entanto, para a estação de Amarante, os dados diários de precipitação não se encontram disponíveis, pelo que se procurou, nas proximidades, uma estação representativa. Assim, recorreu-se à estação de Penafiel, cujo valor mensal de precipitação era próximo (ligeiramente superior), e em que a proximidade da estação permite inferir o comportamento diário da precipitação da área de estudo.

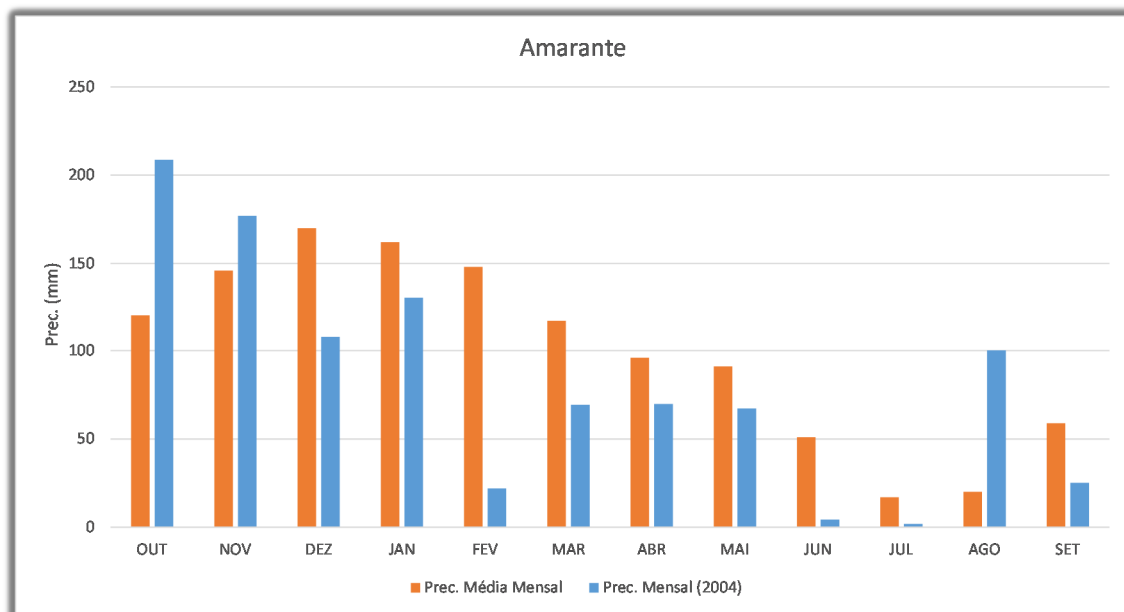


Figura 29. Precipitação média mensal e precipitação mensal no ano de 2004, na estação de Amarante (SNIRH, 06I/01G).

Assim, verificou-se que a precipitação do mês de Agosto de 2004 corresponde essencialmente a dois períodos (figura 30): nos dias 9 e 10, com cerca de 35 mm de precipitação acumulada e no período 16 a 19, com cerca de 90 mm acumulados. Destaca-se ainda, dentro deste último intervalo, o valor registado no dia 18 de Agosto, 50 mm.

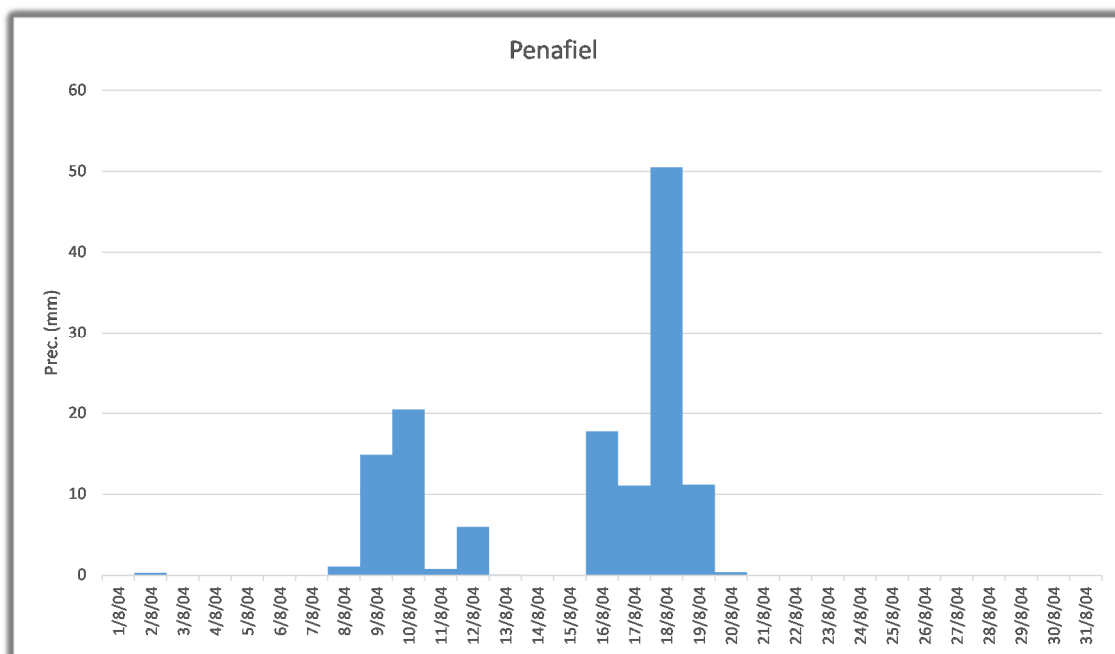


Figura 30. Precipitação diária no mês de Agosto de 2004, na estação de Penafiel (SNIRH, 06H/01UG).

4.5. Ocupação do Solo e Condicionantes de Ordenamento: Breve Síntese

De acordo com a carta de uso e ocupação do solo de Portugal Continental para 2007, COS2007 (IGP, 2010) verifica-se a existência de uma heterogeneidade de usos na área em estudo e na sua envolvente (quadro 26 e figura 31).

Quadro 26. Classes de ocupação do solo na área de S. Simão e região envolvente (cf. figura 31).

Uso do solo COS (2007)	Área total		Vertente S. Simão	
	(km ²)	%	(km ²)	%
Áreas agrícolas heterogéneas	1,8	20,5	0,03	10,3
Culturas permanentes	0,1	1,1	0	0,0
Culturas temporárias	1,6	18,2	0,1	34,5
Florestas	3	34,1	0,1	34,5
Florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea	1,9	21,6	0,04	13,8
Tecido Urbano	0,4	4,5	0,02	6,9
<i>Total</i>	8,8	100,0	0,29	100,0

Relativamente à área envolvente da vertente de S. Simão, representada na figura 31 e totalizando 8,8 km², verifica-se que a classe com maior representatividade (segundo a COS2007 – nível 2) é a classe das Florestas (34,1 %). Seguem-se as áreas de florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea (21,6 %), as áreas agrícolas heterogéneas (20,5 %) e as culturas temporárias (18,2 %). Estas classes representam 94,4 % da área total, os restantes 5,6% correspondem às classes com menor representatividade, nomeadamente o tecido urbano (4,5 %) e as culturas permanentes (1,1 %).

A área em estudo (vertente de S. Simão), corresponde a 3,3 % da área total representada. No que concerne aos usos do solo com maior representatividade, verifica-se que são as culturas temporárias (34,5 %) e as florestas (34,5 %) que ocupam 69 % da área em estudo. Os restantes 31 % da área são ocupados por: i) florestas abertas e vegetação arbustiva e herbácea (13,8 %); ii) áreas agrícolas heterogéneas (10,3 %); iii) tecido urbano (6,9 %). O trabalho de campo efetuado na área em estudo permitiu, de certo modo, validar os dados agora apresentados. Realça-se a presença de uma significativa densidade de árvores jovens, onde predomina o eucalipto (*Eucalyptus globulus*), o pinheiro bravo (*Pinus pinaster*), o carvalho alvarinho (*Quercus robur*) e o carvalho negral (*Quercus pyrenaica*).

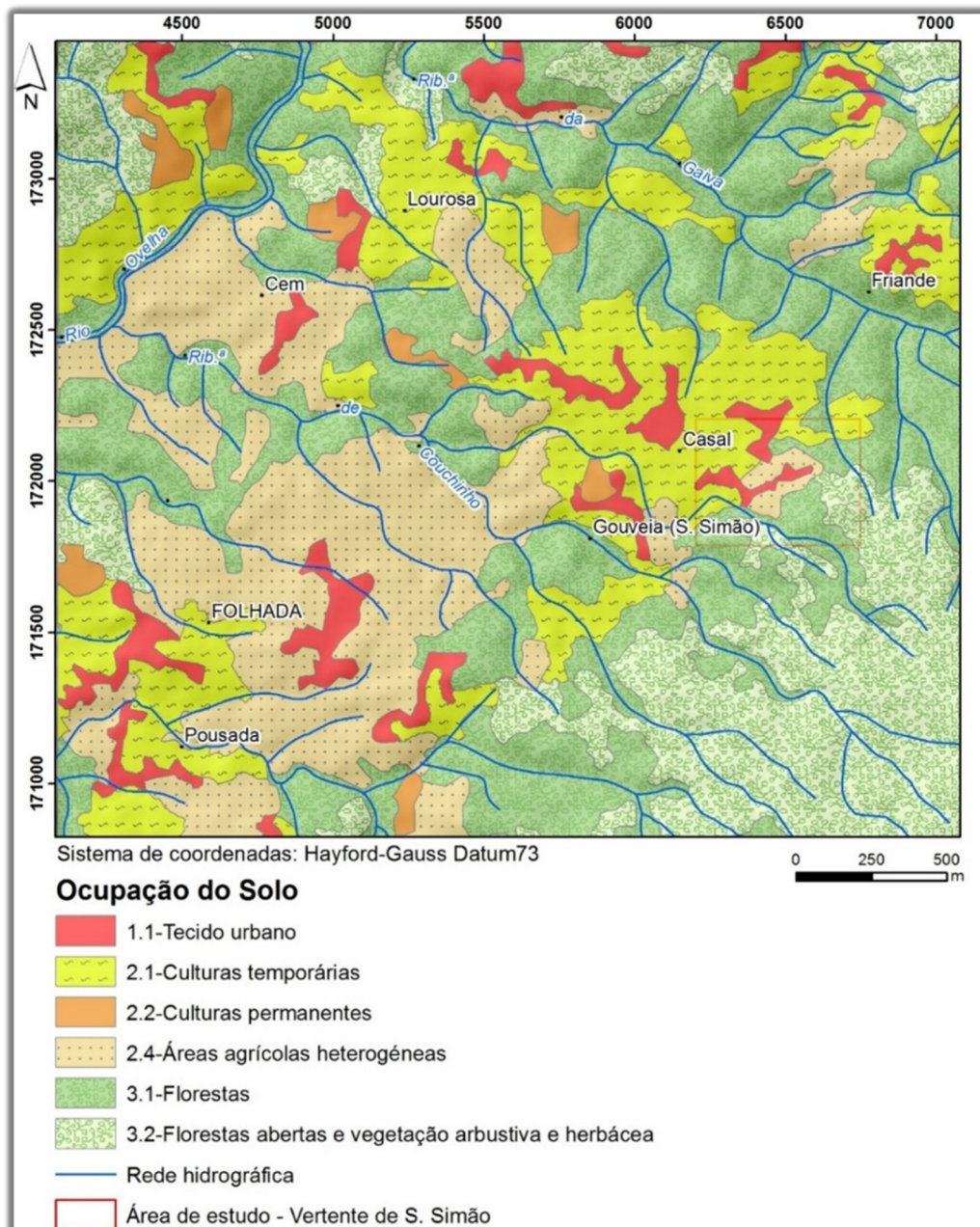


Figura 31. Carta de ocupação do solo da área de Gouveia (S. Simão, Amarante).

4.6. Caracterização da Vertente e Condições Geológicas e Geotécnicas

4.6.1. Generalidades

A avaliação preliminar de campo da vertente de S. Simão permitiu caracterizá-la em termos globais (Anexo I) e dividi-la em cinco setores (figura 32). As condições de acesso da vertente variam entre fáceis e difíceis, de acordo com o sector considerado. A orientação geral da vertente é NW-SE, apresenta uma altura máxima de 70 m, exhibe declives acentuados na ordem dos 35° a 45°, uma extensão longitudinal de cerca de 120 m e uma área de exposição de 9000 m². A rede hidrográfica é de carácter temporária.

Para cada setor foi criada uma ficha de inspeção-geral na qual se procedeu a uma caracterização global dos cinco setores (Anexo II). Nos setores I, III e IV foram definidos diversos perfis geológico-geotécnicos, ao longo dos quais se aplicou a técnica da amostragem linear (figura 33). Apresenta-se, seguidamente, uma breve descrição dos cinco setores definidos:

- i. O setor I é de acesso fácil, apresenta uma altura de 30 m, declives que oscilam entre 35° e 40°, uma extensão longitudinal de 50 m e uma área de exposição de 2150 m², a cobertura vegetal, quando existe, é do tipo herbácea dispersa e arbórea dispersa;
- ii. O setor II é de difícil acesso, sendo a sua altura de 30 m, variando os declives entre 35° e 40°, apresenta uma extensão longitudinal de 60 m e uma área de exposição de 2670 m², a cobertura vegetal é do tipo herbácea dispersa e arbustiva;
- iii. O setor III é de acesso difícil, apresentando uma altura de 20 m, declives que variam entre 40° e 45°, uma extensão longitudinal de 40 m e uma área de exposição de 2530 m², a cobertura vegetal, quando existe, é do tipo herbácea dispersa, arbustiva e arbórea dispersa;
- iv. O setor IV é de difícil acesso, sendo a sua altura de 70 m, variando os declives entre 40° e 45°, com uma extensão longitudinal de 110 m e uma área de exposição de 3150 m², a cobertura vegetal, quando existe, é do tipo arbustiva densa;
- v. O setor V é de acesso fácil a difícil, apresentando uma altura de 40 m, declives na ordem de 40° a 45°, uma extensão longitudinal de 75 m e uma área de exposição de 3350 m², a cobertura vegetal é do tipo herbácea, arbustiva dispersa e arbórea dispersa a densa.

Os estudos geológicos de campo levados a cabo permitiram o reconhecimento geomorfológico, geoestrutural e geológico do local. O reconhecimento permitiu ainda definir a unidade geológica e o zonamento geotécnico principal, os quais foram caracterizados geomecanicamente com base em ensaios esclerométricos (ou de compressão uniaxial) nos maciços rochosos e nos blocos de rocha. Neste tópico apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos para a vertente rochosa em estudo.

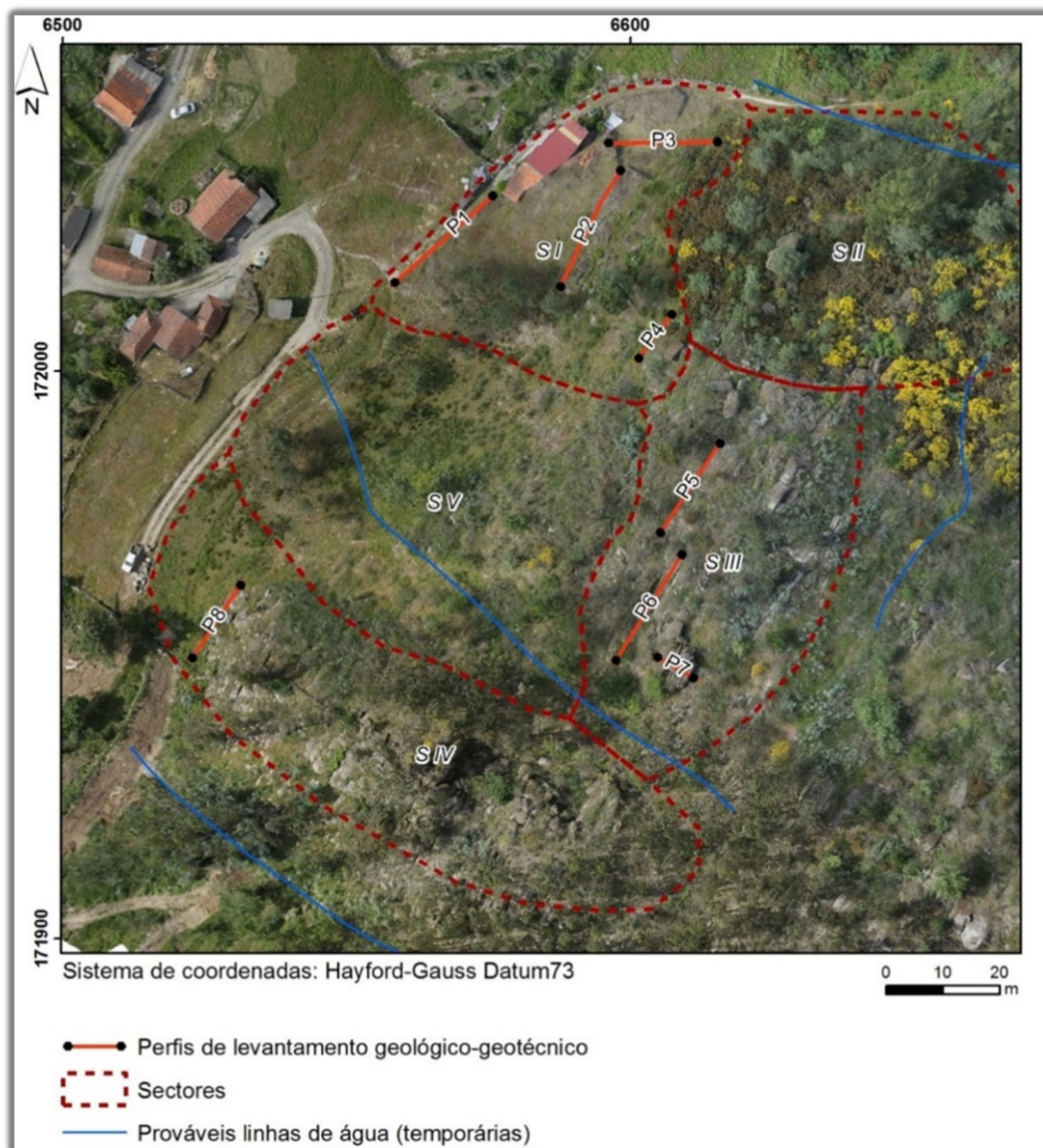


Figura 32. Sectores de estudo e perfis geológico-geotécnicos definidos para estudos de pormenor na vertente rochosa de S. Simão.

4.6.2. Estudos Geológico-Geotécnicos

Na vertente estudada reconheceu-se como unidade litológica o granito porfíroide de grão grosseiro, essencialmente biotítico. Em regra, esta rocha encontra-se pouco a medianamente alterada (W_{1-2} a W_3), de cor cinzenta-esbranquiçada, por vezes rosada, face à dominância de megacristais de feldspato potássico (ortóclase).

De uma maneira geral, o maciço rochoso desta vertente apresenta um grau moderado a elevado de discontinuidades. Destacam-se as estruturas, nomeadamente, diaclases e falhas, geradas em regime frágil a dúctil-frágil, mais superficiais e associadas ao alívio de tensões do maciço, formando essas superfícies de rotura.

4.6.3. Zonamento Geotécnico

Com o resultado do cruzamento e da síntese de toda a informação geológica, geotécnica e geomecânica recolhida, foi possível elaborar um esboço da qualidade e competência da vertente rochosa de S. Simão. Dadas as características morfológicas e arbustivas da vertente, os setores II e V correspondem a áreas com maior densidade de vegetação e com blocos rochosos que configuram uma espécie de caos de blocos recobertos, em parte, pela vegetação. Deste estudo, obtiveram-se os resultados, seguidamente descritos, para os setores I, III e IV (afloramentos rochosos).

Setor I

Neste setor foram definidos 4 perfis, o perfil P1 com uma extensão de 24,8 m, o perfil P2 com 25,0 m, o perfil P3 com 20,9 m e o perfil P4 com 11,5 m (figura 33).



Figura 33. Aspetos gerais do Setor I.

No quadro 27 apresenta-se uma síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos resultantes do levantamento de campo, sendo esta uma análise global dos 4 perfis estudados. O maciço apresenta-se medianamente a pouco alterado (W_3 a W_{1-2}). Foram registados 59 planos de discontinuidades, a maioria dos quais diaclases, que permitiram definir três famílias: uma dominante subvertical, $N20^\circ-40^\circ E; 70^\circ-80^\circ SE$, e das restantes, uma é subvertical, $N110^\circ-130^\circ E; 75^\circ-$

85°SW e a outra sub-horizontal, N20°-30°E;5°-20°NW. As discontinuidades apresentam, fundamentalmente, espaçamentos afastados (F_{1-2}), com um valor médio global de 104,6 cm, ocorrendo com alguma representatividade (22%) os espaçamentos próximos (F_{4-5}). As discontinuidades apresentam-se, na maioria dos casos, fechadas e sem qualquer preenchimento e no geral pouco a medianamente contínuas. Neste setor foram realizadas 22 estações geomecânicas (ensaio esclerométrico), as quais conduziram a uma resistência à compressão uniaxial média (S3; \approx 35-55 MPa). O $RQD_{teórico}$ estimado para este setor é da ordem de 70 a 80 %. Este setor corresponde à zona geotécnica ZGII.

Quadro 27. Quadro-síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (segundo a ISRM, 1978, 1981) do maciço do Setor I.

Vertente de São Simão - Amarante (Sector I: Perfis 1, 2, 3 e 4), (n = 59)				
Litologia	Granito porfíroide de grão grosseiro, essencialmente biotítico			
Grau de Alteração	W _{1,2} (n = 15)	W ₃ (n = 44)	W _{4,5}	
	25%	75%	--	
Grau de Fracturação				
Tipo de descontinuidade	Falha (n = 5)	Diaclase (n = 54)		
	8%	92%		
Famílias principais descontinuidades				
Análise Global	N 20º - 40º E; 70º - 80º SE / N 110º - 130º E; 75º - 85º SW / N 20º - 30º E; 5º - 20º NW			
Diaclases	-			
Falhas	-			
Diagramas de Contorno Estrutural				
Diagramas de Rosetas				
Espaçamento / "Fracture Intercept"	F _{1,2} (n = 39)		F ₃ (n = 7)	F _{4,5} (n = 11)
	66%		12%	22%
Valor médio e intervalo por classe (cm)	152,4 [140 - 170]		44,6 [40 - 50]	8,2 [5 - 15]
Valor médio e intervalo global (cm)	F ₂ : 104,6 [90 - 125]			
Abertura	Fe.		Ab.	M.A.
	90%		8%	2%
Valor médio (mm)	4,7			
Continuidade	M.P.C.	P.C.	M.C.	C.
	14%	64%	22%	--
Valor médio (m)	2,0			
Terminação	R		D	O
	27%		68%	5%
Curvatura	C ₁₋₂		C ₃	C ₄₋₅
	81%		15%	4%
Rugosidade	R ₁₋₂		R ₃	R ₄₋₅
	53%		44%	3%
Enchimento	Qua.	Arg.	Ro./R.	Ve.
	-	-	3%	-
Presença de água	Não		"Húmido"	
	100%		-	
Resistência à compressão uniaxial	S ₂ (n = 4)		S ₃ (n = 17)	S ₄ (n = 1)
	18%		77%	5%
Valor médio e intervalo por classe (MPa)	83,9 [75 - 95]		38,6 [30 - 50]	17,2
Valor médio e intervalo global (MPa)	S ₃ : 45,9 [35 - 55]			
RQD teórico (RQDt)	RQDt			
Valor médio e intervalo por classe (%)	85 [85 - 90]		35 [30 - 40]	-
Valor médio e intervalo global (%)	75 [70 - 80]			

Setor III

Neste setor foram definidos 2 perfis, o perfil P5 com 20,8 m de extensão e o perfil P6 com 23,8 m (figura 34).



Figura 34. Aspectos gerais do Setor III.

No quadro 28 apresenta-se uma síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos resultantes do levantamento de campo, sendo esta uma análise global dos 2 perfis estudados. O maciço apresenta-se pouco alterado a são (W_{1-2}). Foram registados 46 planos de discontinuidades, a maioria dos quais diaclases, que permitiram definir três famílias, duas sub-verticais e uma sub-horizontal: a dominante é $N30^{\circ}-40^{\circ}E;70^{\circ}-80^{\circ}SE$ e as restantes $N115^{\circ}-135^{\circ}E;60^{\circ}-80^{\circ}SW$ e $N45^{\circ}-85^{\circ}E;15^{\circ}-30^{\circ}SE$.

As discontinuidades apresentam espaçamentos afastados (F_2) a próximos (F_{4-5}) com um valor médio global de 73,7 cm. As discontinuidades apresentam-se fechadas a muito abertas, sem preenchimento ou, quando este existe, corresponde a rocha/rocha esmagada. Em termos de continuidade, são pouco a medianamente contínuas. Neste setor foram realizadas 12 estações geomecânicas (ensaio esclerométrico), as quais conduziram a uma resistência à compressão uniaxial média (S_3 ; $\approx 30-40$ MPa). O $RQD_{teórico}$ estimado para este sector é da ordem de 55 a 70%. Este sector corresponde à zona geotécnica ZGIII.

Quadro 28. Quadro-síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (segundo a ISRM, 1978, 1981, 2007) do maciço do Setor III.

Vertente de São Simão - Amarante (Sector III: Perfis 5 e 6), (n = 46)					
Litologia	Granito porfiróide de grão grosseiro, essencialmente biotítico				
Grau de Alteração	W _{1,2} (n = 46)		W ₃	W _{4,5}	
	100%		-	-	
Grau de Fracturação	Falha (n = 6)		Diaclase (n = 40)		
Tipo de descontinuidade	13%		87%		
Famílias principais descontinuidades					
Análise Global	N 30° - 40° E; 70° - 80° SE / N 115° - 135° E; 60° - 80° SW / N 45° - 85° E; 15° - 30° SE				
Diaclases	-				
Falhas	-				
Diagramas de Contorno Estrutural					
Diagramas de Rosetas					
Espaçamento / "Fracture Intercept"	F _{1,2} (n = 22)		F ₃ (n = 8)	F _{4,5} (n = 14)	
	47%		17%	35%	
Valor médio e intervalo por classe (cm)	140,7 [130 - 160]		45,5 [35 - 55]	3,8 [3 - 10]	
Valor médio e intervalo global (cm)	F ₂ : 73,7 [60 - 90]				
Abertura	Fe.		Ab.	M.A.	
	52%		4%	44%	
Valor médio (mm)	44,1				
Continuidade	M.P.C.	P.C.	M.C.	C.	Mt. C.
	7%	70%	24%	-	-
Valor médio (m)	2,1				
Terminação	R		D	O	
	61%		39%	-	
Curvatura	C _{1,2}		C ₃	C _{4,5}	
	48%		33%	19%	
Rugosidade	R _{1,2}		R ₃	R _{4,5}	
	2%		80%	18%	
Enchimento	Qua.	Arg.	Ro./R.	Ve.	S/Pre.
	-	-	59%	-	41%
Presença de água	Não		"Húmido"		
	100%		-		
Resistência à compressão uniaxial	S ₁	S ₂	S ₃ (n = 12)	S ₄	S ₅
	-	-	100%	-	-
Valor médio e intervalo por classe (MPa)	35,7 [30 - 40]				
Valor médio e intervalo global (MPa)	S ₃ : 35,7 [30 - 40]				
RQD teórico (RQDt)	RQDt				
Valor médio e intervalo por classe (%)	85 [80 - 90]		35 [25 - 45]	-	
Valor médio e intervalo global (%)	65 [55 - 70]				

Setor IV

Neste sector foi apenas definido um perfil, o perfil P8 com 17,3 m de extensão (figura 35), com características meramente exploratórias e comparativas com os restantes sectores.



Figura 35. Aspectos gerais do Setor IV.

No quadro 29 apresenta-se uma síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos resultantes do levantamento de campo. O maciço apresenta-se medianamente alterado (W_3). Foram registados 17 planos de descontinuidades, correspondendo a diaclases, que permitiram definir três famílias, sendo a dominante subvertical, $N130^\circ-140^\circ E; 60^\circ-80^\circ SW$, e das restantes duas, uma é sub-horizontal, a saber, $N105^\circ-115^\circ E; 55^\circ-70^\circ SW$ e $N130^\circ-140^\circ E; 30^\circ-40^\circ SW$. As descontinuidades apresentam, fundamentalmente, espaçamentos afastados (F_{1-2}) com um valor médio de 88,5 cm. As descontinuidades apresentam-se, principalmente, abertas, com uma abertura média de 2,8 mm, sem preenchimento e pouco contínuas. Neste setor foram realizadas 6 estações geomecânicas (ensaio esclerométrico), as quais conduziram a uma resistência à compressão uniaxial média (S_3 ; $\approx 30-45$ MPa). O $RQD_{teórico}$ estimado para este sector é da ordem de 65 a 75%. Este sector corresponde à zona geotécnica ZGI.

Quadro 29. Quadro-síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (segundo a ISRM, 1978, 1981, 2007) do maciço do Sector IV.

Vertente de São Simão - Amarante (Sector IV: Perfil 8), (n = 17)					
Litologia	Granito porfíroide de grão grosseiro, essencialmente biotítico				
Grau de Alteração	W ₁₋₂		W ₃ (n = 17)	W ₄₋₅	
	-		100%	-	
Grau de Fracturação	-				
Tipo de descontinuidade	Falha		Diaclase (n = 17)		
	-		100%		
Famílias principais descontinuidades	-				
Análise Global	N 130° - 140° E; 60° - 80° SW / N 105° - 115° E; 55° - 70° SW / N 130° - 140° E; 30° - 40° SW				
Diaclases	-				
Falhas	-				
Diagramas do Contorno Estrutural					
Diagramas de Rosetas					
Espaçamento / "Fracture Intercept"	F ₁₋₂ (n = 11)		F ₃ (n = 2)	F ₄₋₅ (n = 3)	
	64%		12%	24%	
Valor médio e intervalo por classe (cm)	122,0 [110 - 140]		48,5 [35 - 55]	3,3 [3 - 10]	
Valor médio e intervalo global (cm)	F ₂ : 88,5 [80 - 100]				
Abertura	Fe.		Ab.	M.A.	
	35%		59%	6%	
Valor médio (mm)	2,8				
Continuidade	M.P.C.	P.C.	M.C.	C.	Mt. C.
	-	100%	-	-	-
Valor médio (m)	1,4				
Terminação	R		D	O	
	18%		82%	-	
Curvatura	C ₁₋₂		C ₃	C ₄₋₅	
	59%		12%	29%	
Rugosidade	R ₁₋₂		R ₃	R ₄₋₅	
	12%		47%	41%	
Enchimento	Qua.	Arg.	Ro./R.	Ve.	S/Pre.
	-	-	-	-	100%
Presença de água	Não		"Húmido"		
	100%		-		
Resistência à compressão uniaxial	S ₁	S ₂	S ₃ (n = 6)	S ₄	S ₅
	-	-	100%	-	-
Valor médio e intervalo por classe (MPa)	-		34,3 [30 - 45]	-	-
Valor médio e intervalo global (MPa)	S ₃ : 34,3 [30 - 45]				
RQD teórico (RQDt)	RQDt				
Valor médio e intervalo por classe (%)	80 [75 - 85]		40 [25 - 45]	-	
Valor médio e intervalo global (%)	70 [65 - 75]				

4.6.4. Definição da Blocometria Geral dos Sectores I, III e IV

A importância da determinação do bloco unitário dos maciços rochosos é significativa (González de Vallejo & Ferrer, 2011). A dimensão dos blocos que formam o maciço rochoso condiciona o seu comportamento, as suas propriedades de resistência e a sua deformabilidade. A forma do bloco unitário é determinada, em regra, a partir da orientação das descontinuidades e do número de famílias, enquanto a dimensão dos blocos é determinada pelo seu espaçamento, continuidade e

número de famílias de descontinuidades. A determinação do tamanho dos blocos pode ser realizada de diversas formas, entre as quais através do parâmetro J_v (*volumetric joint count*). Este parâmetro representa o número total de descontinuidades que intersectam uma unidade de volume (1 m^3) de um dado maciço rochoso (ISRM, 1978; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

No que diz respeito ao setor I, a dimensão dos blocos é média a grande, uma vez que o J_v varia entre 2.9 e 3.3 descontinuidades/ m^3 . Por outro lado, no setor III a dimensão dos blocos é média, visto que o J_v varia entre 3.8 e 4.1 descontinuidades/ m^3 . Por seu turno, no setor IV os blocos são pequenos a médios, variando o J_v entre 9.5 e 11.5 descontinuidades/ m^3 . A figura 36 ilustra de forma esquemática a geometria dos blocos rochosos para os sectores I, III e IV.

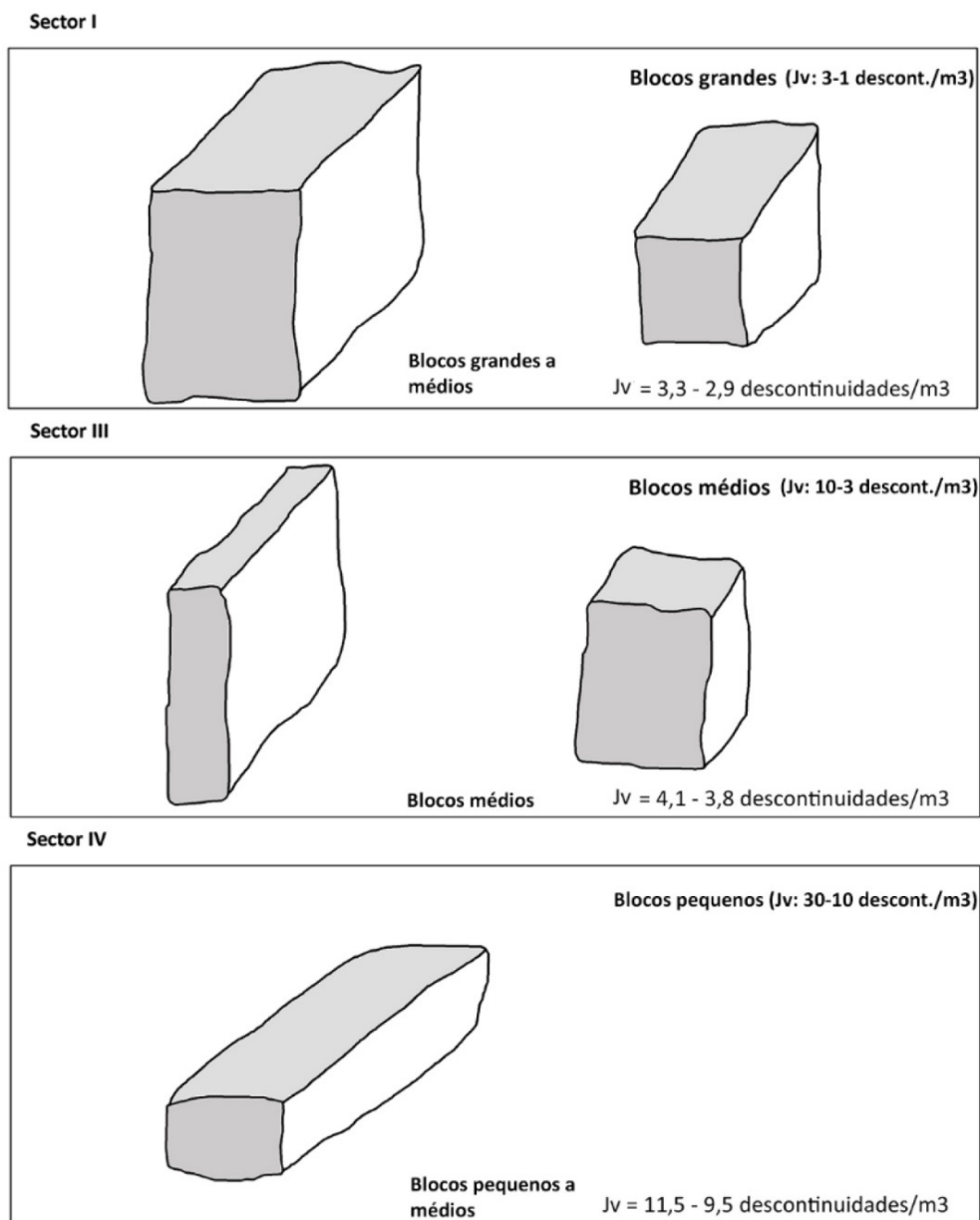


Figura 36. Geometria típica dos blocos rochosos nos setores I, III e IV.

4.6.5. Zonamento Geotécnico: Uma Proposta

Conjugando toda a informação anterior e as investigações geológico-geotécnicas realizadas no terreno foi possível definir uma cartografia de zonamento geotécnico para a área de S. Simão. Definiu-se, em grande, uma área (setores II e V – ZG0) constituída essencialmente por blocos rochosos imbricados ou isolados e os restantes setores (I, III e IV) representados por uma vasta área constituída por maciço rochoso fraturado (ZG1 a ZG3). A figura 37 apresenta o zonamento geotécnico para a vertente de S. Simão.

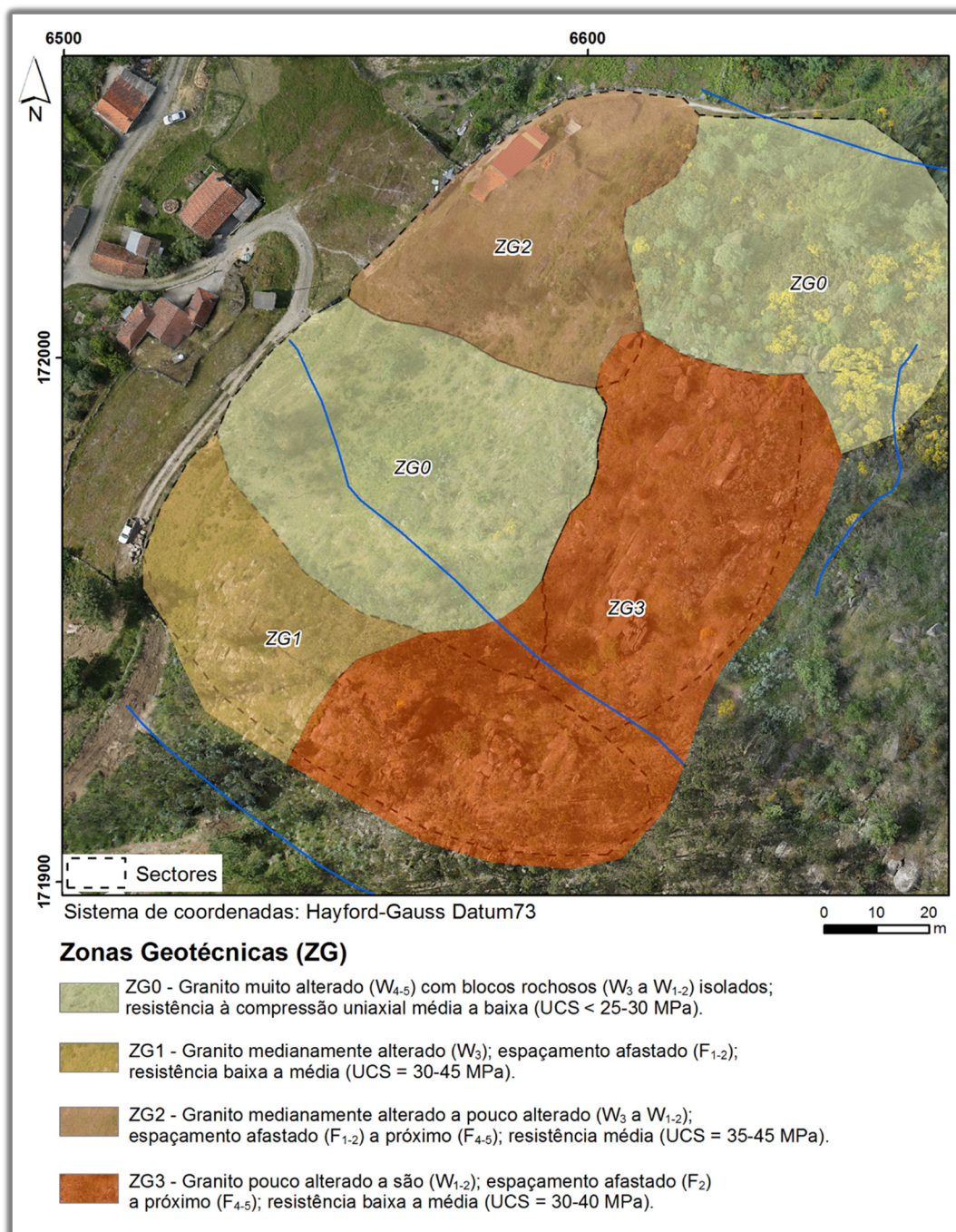


Figura 37. Cartografia de zonamento geotécnico para a vertente de S. Simão.

4.7. Classificações Geomecânicas e Análise de Estabilidade

4.7.1. Geomecânica de Taludes Rochosos

De modo a avaliar a competência do maciço rochoso da vertente de S. Simão aplicaram-se três classificações geomecânicas: “Rock Mass Rating [RMR]” (Bieniawski, 1989, 1993; Celada et al., 2014), “Slope Mass Rating [SMR]” (Romana, 1985, 1993, 1997) e “Geological Strength Index [GSI – versões 1998 e 2013]” (Hoek et al., 1998; Marinos & Hoek, 2000; Marinos et al., 2005; Hoek et al., 2013). No quadro 30 apresenta-se a síntese dos resultados das três classificações aplicadas aos setores I, III e IV da vertente de S. Simão. De acordo com a análise das classificações aplicadas, o setor I classifica-se de qualidade razoável a boa, o setor III de qualidade razoável a fraca e o sector IV de qualidade boa a razoável.

Quadro 30. Síntese das características dos setores I, III e IV da vertente de S. Simão, de acordo com as classificações geomecânicas RMR, SMR e GSI.

Sectores / Classificações geomecânicas	RMR (<i>Bieniawski, 1989</i>)	SMR (<i>Romana, 1985, 1993</i>)	GSI (<i>Hoek et al., 1998</i>)	GSI (<i>Hoek et al. 2013</i>)
Sector I	50	71	65 - 70	58
	Maciço de qualidade razoável (Classe III)	Maciço de boa qualidade (Classe IIa)	Maciço de boa qualidade	Maciço de boa qualidade a razoável
Sector III	42	33	60 - 65	43
	Maciço de qualidade razoável (Classe III) a fraca (Classe IV)	Maciço de má qualidade (Classe IVa)	Maciço de boa qualidade	Maciço de qualidade razoável
Sector IV	62	76	70 - 75	58
	Maciço de boa qualidade (Classe II) a razoável (Classe III)	Maciço de boa qualidade (Classe IIa)	Maciço de boa qualidade	Maciço de boa qualidade a razoável

4.7.2. Parâmetros Geomecânicos Adotados

Tendo em vista a necessidade da obtenção dos parâmetros geológico-geotécnicos para a introdução nos respetivos modelos geomecânicos, apresenta-se nos quadros 31 e 32 uma síntese de alguns parâmetros geomecânicos necessários na utilização dos modelos de cálculo.

Quadro 31. Resumo dos parâmetros geomecânicos estimados para a vertente de S. Simão.

Sectores / Classificações geomecânicas	Litologia	Resistência à Compressão Uniaxial, UCS (MPa)	Peso volúmico, γ (kN/m ³)
Sector I	Granito porfiróide, de grão grosseiro, essencialmente biotítico	S_3 : 45,9 [35 - 55]	26
Sector III		S_3 : 35,7 [30 - 40]	
Sector IV		S_3 : 34,3 [30 - 45]	

Quadro 32. Valores de coesão (c), ângulo de atrito (ϕ) e parâmetro da rocha intacta (m_i) para o maciço da vertente de S. Simão.

Sectores / Classificações geomecânicas	Litologia	Coesão, c (MPa) (González de Vallejo & Ferrer, 2011)	Ângulo de atrito, ϕ (°) (González de Vallejo & Ferrer, 2011)	m_i (Hoek, 2007)
Sector I	Granito porfiróide, de grão grosseiro, essencialmente biotítico	15 - 50	40° - 50°	33
Sector III				
Sector IV				

4.7.3. Cartografia de Zonamento Geomecânico

A figura 38 ilustra a cartografia de zonamento geomecânico evidenciando as duas zonas geomecânicas (ZGM1 e ZGM2) do maciço rochoso de S. Simão.

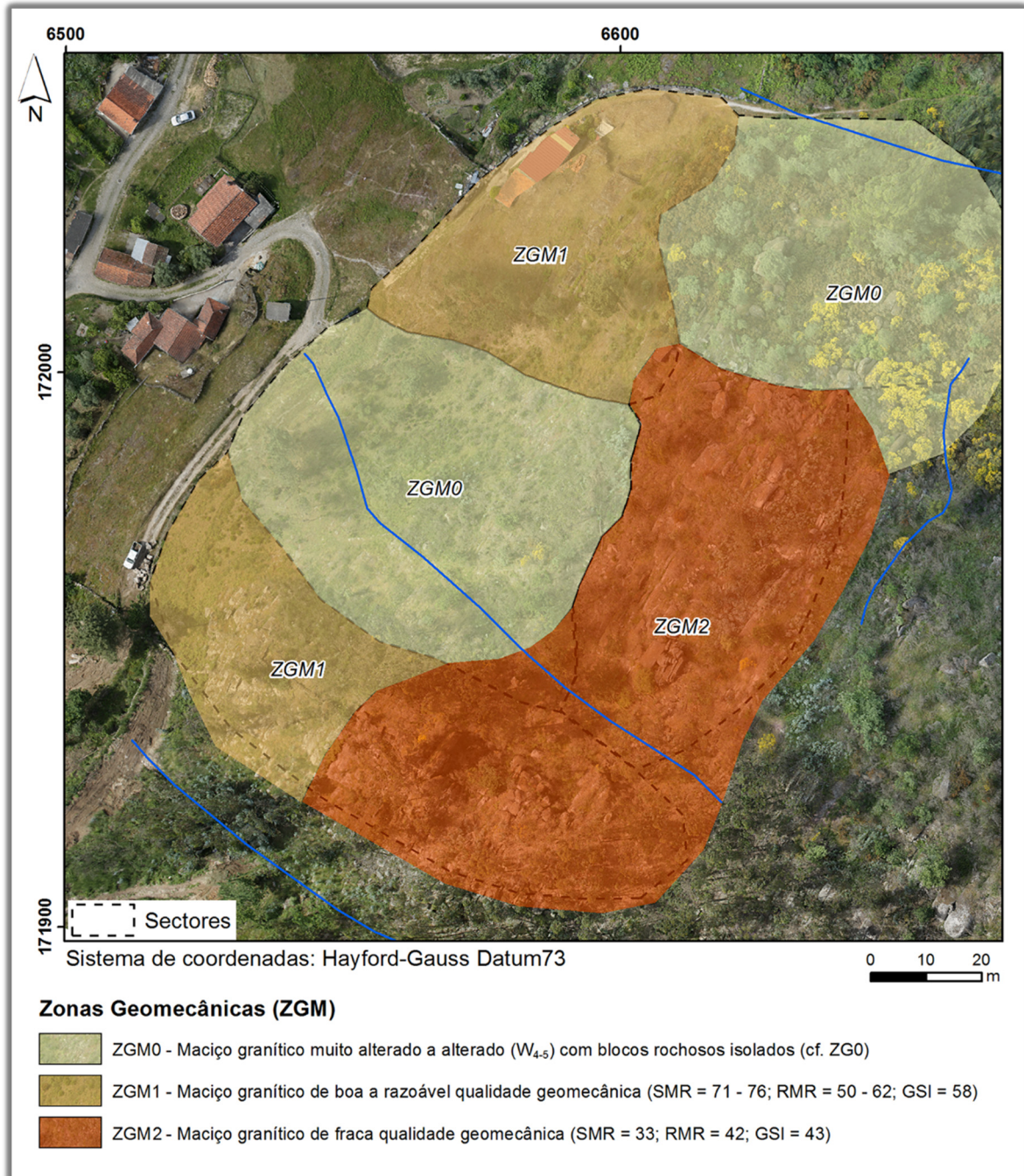


Figura 38. Cartografia de zonamento geomecânico para a vertente de S. Simão.

4.7.4. Análise de Estabilidade Geoestrutural

De acordo com as classes de estabilidade estabelecidas por Romana (1985, 1995, 1997), os setores I e IV são considerados como estáveis e o sector III como instável. Relativamente aos tipos de rotura prováveis, função do valor de SMR, nos setores I e IV não deverão ocorrer muitos fenómenos de instabilidade; por seu turno, no setor III poderão ocorrer diversos fenómenos de instabilidade, nomeadamente, tombamentos, roturas em cunha e mesmo roturas planares. Não obstante as propostas de estabilidade e tipos de rotura de Romana (1985, 1995, 1997), procedeu-se à caracterização da estabilidade dos sectores em apreço baseada no designado “Teste de Markland” (Hoek & Bray, 1981; Wyllie & Mah, 2004; Wyllie, 2014). Nesta análise foi considerada a orientação média dos setores e das três famílias de descontinuidades, referidas anteriormente, bem como os valores extremos do intervalo do ângulo de atrito (ϕ), atrás mencionados (40° - 50°). Tal como recomenda o Eurocódigo 7 (NP EN 1997-1, 2010), foi aplicado um coeficiente de segurança parcial de 1.25 à tangente do ângulo de atrito, pelo que os valores de cálculo utilizados na análise da estabilidade foram de 34° e 44° . Contudo, o valor de 44° não foi projetado, uma vez que este círculo de atrito não intersecta a face dos setores estudados. Nesta análise foram consideradas, não só as atitudes médias das três famílias de descontinuidades, mas igualmente a variação dessas atitudes (figura 39).

Setor I

A análise de estabilidade relativa ao setor I (figura 39a,d) permite constatar que a família principal de descontinuidades (F1) pode dar origem a roturas por tombamento, uma vez que estas descontinuidades apresentam uma inclinação contrária à inclinação do setor e uma direcção sub-paralela ao mesmo. Além disso, as intersecções das famílias de descontinuidades F2 e F3 poderão dar origem a roturas em cunha, caso as condições de atrito sofram um decréscimo para valores na ordem dos 15° .

Setor III

A análise de estabilidade relativa ao setor III (figura 39b,d) permite constatar que a família principal de descontinuidades (F1) pode dar origem a roturas por tombamento, uma vez que estas descontinuidades apresentam uma inclinação contrária à inclinação do setor e uma direcção sub-paralela ao mesmo.

Setor IV

A análise de estabilidade relativa ao setor IV (figura 39c,d) permite constatar que as intersecções das famílias de descontinuidades F2 e F3 poderão dar origem a roturas em cunha, caso as condições de atrito sofram um decréscimo para valores na ordem dos 18°.

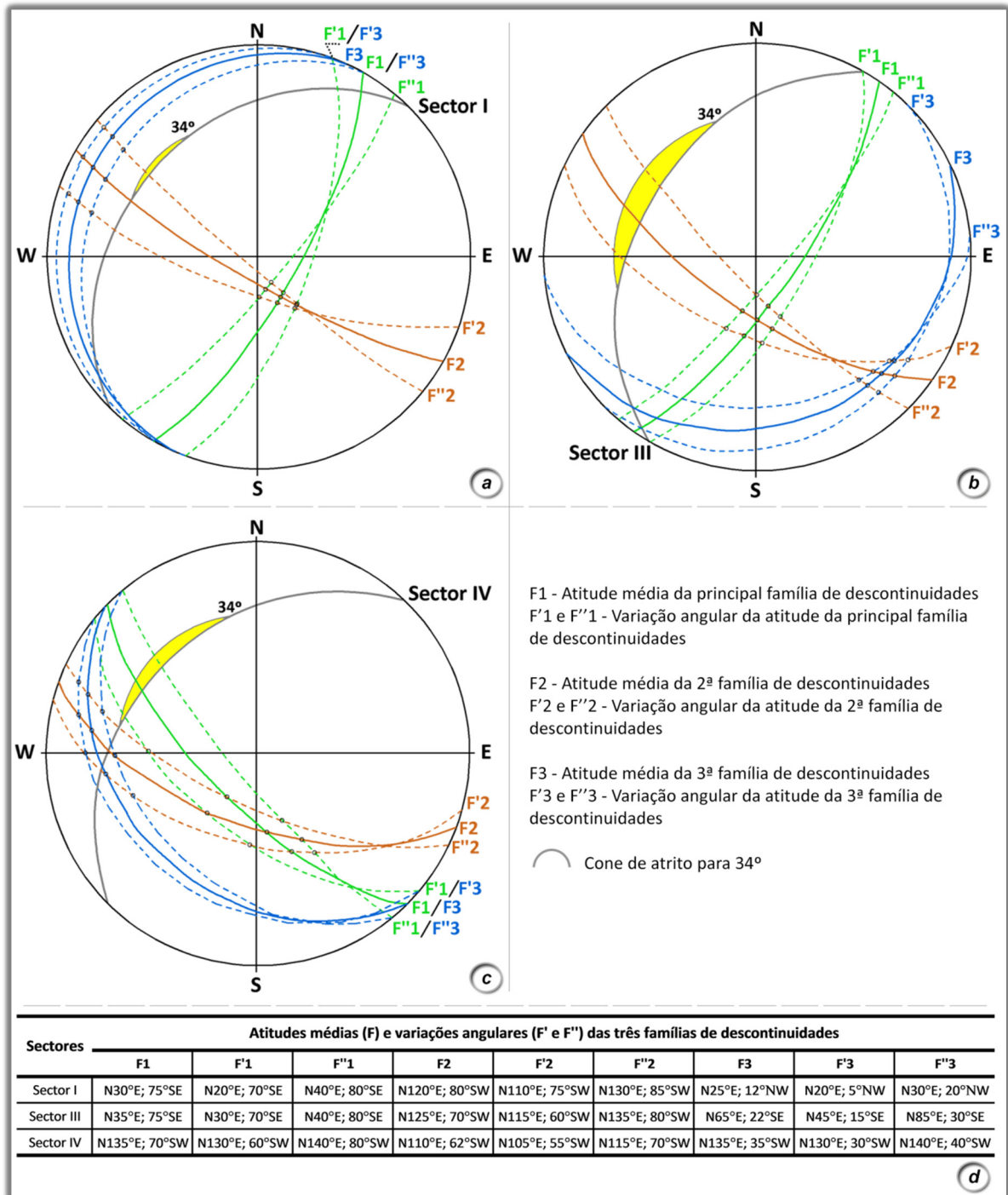


Figura 39. Análise da estabilidade para a vertente de S. Simão: a - Setor I; b – Setor III; c – Setor IV; d - atitudes médias e variações angulares das três famílias de descontinuidades nos 3 setores.

4.7.5. Análise de Suscetibilidade e Nível de Perigosidade de Talude Rochosos

Existe uma grande diversidade de métodos e técnicas para a avaliação da estabilidade de taludes na fase de projeto. Contudo, os métodos e técnicas para esta avaliação durante a fase de exploração, isto é, que utilizam principalmente informações sobre o que foi realmente construído e o seu estado real relatado a partir de inspeções visuais, sistemas de monitorização e informações indiretas (tais como o clima e o zonamento sísmico), são escassos (e.g., Pinheiro et al., 2015; Vaz & Zêzere, 2016). Apesar de já terem sido propostos diversos sistemas de classificação de qualidade geotécnica e estrutural, estes apresentam, normalmente, um número limitado de fatores envolvidos na estabilidade dos taludes rochosos e estão, em geral, limitados à análise de alguns processos de rotura, tais como o *Rockfall Hazard Rating System (RHRS)* proposto por Pierson et al. (1990), o qual foi posteriormente modificado e atualizado por Budetta (2004), o *RHRSm*, e mais recentemente adaptado por Pinheiro et al., (2014, 2015), o *RHRSm2*. Este sistema destina-se à obtenção de um índice de qualidade aplicado a taludes predominantemente rochosos em meios rodoviários.

Neste sentido, o *Índice de Qualidade de Taludes (SQI – Slope Quality Index)*, desenvolvido por Pinheiro et al. (2015), é um sistema que integra a avaliação de uma vasta gama de fatores internos e externos relacionados com a qualidade e estabilidade dos taludes. Este sistema baseia-se no sistema de classificação de maciços rochosos, desenvolvido por Liu et al. (2007).

De modo a avaliar a suscetibilidade e o nível de perigosidade da vertente rochosa de S. Simão foram aplicados, com diversas adaptações, o *Rockfall Hazard Rating System*, versão *RHRSm2*, e o *Índice de Qualidade de Taludes (SQI)*, ambos propostos por Pinheiro et al. (2015). Salienta-se o facto de o índice SQI incorporar no seio dos fatores geológico-geomecânicos o valor obtido para o sistema *RHRSm2* e ainda, por exemplo, o *SMR (Slope Mass Rating)* ou o *RMR (Rock Mass Rating)*. Além disso, o sistema *RHRSm2* desenvolvido por Pinheiro et al. (2015) apresenta a flexibilidade para ser adaptado, tendo no presente estudo sofrido algumas modificações para vertentes rochosas de origem natural.

O sistema *RHRSm2* foi aplicado às zonas geomecânicas ZGM0, ZGM1 e ZGM2, tendo sido eliminados alguns parâmetros que não se enquadravam com a vertente rochosa em estudo, a saber: nas zonas ZGM0 e ZGM1, a largura da banqueteta, a eficácia da valeta de plataforma, o volume da queda de blocos/evento e o historial de queda de blocos, e, na zona ZGM2, a largura da banqueteta e a eficácia da valeta de plataforma. A zona ZGM0, foi desdobrada em duas, as zonas ZGM0a e ZGM0b, uma vez que os setores envolvidos, setor V e setor II, respetivamente, têm características diferentes. Nos quadros 33, 34, 35 e 36 são apresentados para este sistema os respetivos parâmetros que se

enquadram corretamente para avaliação de cada zona geomecânica e as respectivas opções tomadas, realizadas a cor cinza, em função de cada um dos parâmetros.

Quadro 33. Aplicação da classificação RHRSm2 à zona geomecânica ZGM0a (Setor V).

RHRSm2 - ZGM0a (Setor V)				
Categorias	Ratings			
	3 pontos	9 pontos	27 pontos	81 pontos
Altura do talude (m)	7,5	7,5 – 22,5	22,5 – 30	> 30
Inclinação do talude (°)	< 30	30 – 40	40 – 50	> 50
Zona de influência (distância entre a base do talude e a estrada mais próxima)	Distante	Medianamente próxima	Próxima	Muito próxima
Largura da estrada (m)	21,5	15,5	9,5	3,5
Condições estruturais	Descontinuidades descontínuas, orientação favorável	Descontinuidades descontínuas, orientação aleatória	Descontinuidades descontínuas, orientação desfavorável	Descontinuidades contínuas, orientação desfavorável
Grau de alteração (W)	Baixo, W ₁	Baixo a Moderado, W ₂ –W ₃	Moderado a Elevado, W ₃ –W ₄	Extremo, W ₅
Erosão	Pequena	Moderada	Elevada	Extrema
Tamanho dos blocos (m)	0,3	0,6	0,9	1,2
Quantidade de blocos	Nenhum	Poucos	Alguns	Muitos
Irregularidade da face do talude	Baixa	Média	Elevada	Muito elevada
Presença de água	Seco	Húmido	Gotejante	Fluxo
Risco médio para os veículos (AVR)	25%	50%	75%	100%
Distância de visão para os condutores	Adequada, 100%	Moderada, 80%	Limitada, 60%	Muito limitada, 40%
Precipitação (mm)	Baixa, < 1000	Moderada, 1000 – 2000	Elevada, > 2000	–

Quadro 34. Aplicação da classificação RHRSm2 à zona geomecânica ZGM0b (Setor II).

RHRSm2 - ZGM0b (Setor II)				
Categorias	Ratings			
	3 pontos	9 pontos	27 pontos	81 pontos
Altura do talude (m)	7,5	7,5 – 22,5	22,5 – 30	> 30
Inclinação do talude (°)	< 30	30 – 40	40 – 50	> 50
Zona de influência (distância entre a base do talude e a estrada mais próxima)	Distante	Medianamente próxima	Próxima	Muito próxima
Largura da estrada (m)	21,5	15,5	9,5	3,5
Condições estruturais	Descontinuidades descontínuas, orientação favorável	Descontinuidades descontínuas, orientação aleatória	Descontinuidades descontínuas, orientação desfavorável	Descontinuidades contínuas, orientação desfavorável
Grau de alteração (W)	Baixo, W ₁	Baixo a Moderado, W ₂ –W ₃	Moderado a Elevado, W ₃ –W ₄	Extremo, W ₅
Erosão	Pequena	Moderada	Elevada	Extrema
Tamanho dos blocos (m)	0,3	0,6	0,9	1,2
Quantidade de blocos	Nenhum	Poucos	Alguns	Muitos
Irregularidade da face do talude	Baixa	Média	Elevada	Muito elevada
Presença de água	Seco	Húmido	Gotejante	Fluxo
Risco médio para os veículos (AVR)	25%	50%	75%	100%
Distância de visão para os condutores	Adequada, 100%	Moderada, 80%	Limitada, 60%	Muito limitada, 40%
Precipitação (mm)	Baixa, < 1000	Moderada, 1000 – 2000	Elevada, > 2000	–

Quadro 35. Aplicação da classificação RHRSm2 à zona geomecânica ZGM1 (Setores I e IV).

RHRSm2 - ZGM1 (Setores I e IV)				
Categorias	Ratings			
	3 pontos	9 pontos	27 pontos	81 pontos
Altura do talude (m)	7,5	7,5 – 22,5	22,5 – 30	> 30
Inclinação do talude (°)	< 30	30 – 40	40 – 50	> 50
Zona de influência (distância entre a base do talude e a estrada mais próxima)	Distante	Medianamente próxima	Próxima	Muito próxima
Largura da estrada (m)	21,5	15,5	9,5	3,5
Condições estruturais	Descontinuidades descontínuas, orientação favorável	Descontinuidades descontínuas, orientação aleatória	Descontinuidades descontínuas, orientação desfavorável	Descontinuidades contínuas, orientação desfavorável
Grau de alteração (W)	Baixo, W ₁	Baixo a Moderado, W ₂ –W ₃	Moderado a Elevado, W ₃ –W ₄	Extremo, W ₅
Erosão	Pequena	Moderada	Elevada	Extrema
Tamanho dos blocos (m)	0,3	0,6	0,9	1,2
Quantidade de blocos	Nenhum	Poucos	Alguns	Muitos
Irregularidade da face do talude	Baixa	Média	Elevada	Muito elevada
Presença de água	Seco	Húmido	Gotejante	Fluxo
Risco médio para os veículos (AVR)	25%	50%	75%	100%
Distância de visão para os condutores	Adequada, 100%	Moderada, 80%	Limitada, 60%	Muito limitada, 40%
Precipitação (mm)	Baixa, < 1000	Moderada, 1000 – 2000	Elevada, > 2000	–

Quadro 36. Aplicação da classificação RHRSm2 à zona geomecânica ZGM2 (Setor III).

RHRSm2 - ZGM2 (Setor III)				
Categorias	Ratings			
	3 pontos	9 pontos	27 pontos	81 pontos
Altura do talude (m)	7,5	7,5 – 22,5	22,5 – 30	> 30
Inclinação do talude (°)	< 30	30 – 40	40 – 50	> 50
Zona de influência (distância entre a base do talude e a estrada mais próxima)	Distante	Medianamente próxima	Próxima	Muito próxima
Largura da estrada (m)	21,5	15,5	9,5	3,5
Condições estruturais	Descontinuidades descontínuas, orientação favorável	Descontinuidades descontínuas, orientação aleatória	Descontinuidades descontínuas, orientação desfavorável	Descontinuidades contínuas, orientação desfavorável
Grau de alteração (W)	Baixo, W ₁	Baixo a Moderado, W ₂ –W ₃	Moderado a Elevado, W ₃ –W ₄	Extremo, W ₅
Erosão	Pequena	Moderada	Elevada	Extrema
Tamanho dos blocos (m)	0,3	0,6	0,9	1,2
Volume da queda de blocos/evento (m ³)	2,3	4,6	6,9	9,3
Quantidade de blocos	Nenhum	Poucos	Alguns	Muitos
Irregularidade da face do talude	Baixa	Média	Elevada	Muito elevada
Presença de água	Seco	Húmido	Gotejante	Fluxo
Historial de queda de blocos	Poucas quedas, 1-10/ano	Algumas quedas, 3/ano	Muitas quedas, 6/ano	Quedas frequentes, 9/ano
Risco médio para os veículos (AVR)	25%	50%	75%	100%
Distância de visão para os condutores	Adequada, 100%	Moderada, 80%	Limitada, 60%	Muito limitada, 40%
Precipitação (mm)	Baixa, < 1000	Moderada, 1000 – 2000	Elevada, > 2000	–

Os valores obtidos para as zonas ZGM0a, ZGM0b, ZGM1 e ZGM2 foram, respetivamente, de 234, 186, 210 e 348. Desta forma, as zonas ZGM0a e ZGM1 enquadram-se num grau de suscetibilidade moderado, sendo preconizada uma intervenção a curto-médio prazo, a zona ZGM0b enquadra-se num grau de suscetibilidade moderado-baixo, sendo preconizada uma intervenção a curto-médio prazo, enquanto que a zona ZGM2 se ajusta a um grau de suscetibilidade moderado-elevado, sendo preconizada uma intervenção a curto prazo-urgente.

Relativamente ao índice SQI, este foi apenas aplicado às zonas geomecânicas ZGM1 e ZGM2, devido ao facto de os parâmetros geológico-geomecânicos para a zona ZGM0 serem insuficientes para a aplicação deste índice. Nesta classificação foram eliminados alguns parâmetros e/ou fatores que não se aplicavam à vertente rochosa em estudo, a saber: os parâmetros ângulo das banquetas e largura das banquetas no fator “Geométricos”, o parâmetro impermeabilização das banquetas no fator “Sistema de drenagem”, o fator “Monitorização” e o parâmetro intervenções no fator “Historial”. Para além disso, foi acrescentado um novo parâmetro, denominado de construções, no fator “Ambientais/Tráfego”, uma vez que existem edificações no sopé da vertente. A eliminação e o acrescento de parâmetros e fatores pressupuseram a redistribuição dos pesos relativos, sem nunca perder a essência que serve de base para esta classificação.

Nos quadros 37 e 38 apresentam-se as opções tomadas para as categorias e pesos, a cor cinza claro, nas duas zonas geomecânicas, bem como a redefinição dos pesos relativos dos fatores e parâmetros, a cor cinza escuro.

Os valores obtidos para as zonas ZGM1 e ZGM2 foram de 2.6 e 2.9, respetivamente. Desta forma, a zona geomecânica ZGM1 reflete uma vertente mediana a boa com um nível de perigosidade moderado a baixo, enquanto que a zona geomecânica ZGM2 reflete uma vertente mediana, com um nível de perigosidade moderado.

(Página propositadamente em branco)

Quadro 37. Aplicação do índice SQI à zona geomecânica ZGM1 (Setores I e IV).

SQI - ZGM1 (Setores I e IV)										
Factores	Parâmetros	Categorias e ratings					Ratings Intermediários			
	Altura do talude (m)	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	> 40				
	0,25 → 0,40	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto				
Geométricos	Rating	1	2	3	4	5	0,380			
	Inclinação do talude (°)	< 30	30 - 40	41 - 50	51 - 60	> 60				
	0,17 → 0,19	Muito gradual	Gradual	Médio	Inclinado	Muito inclinado				
	0,35 → 0,60	Rating	1	2	3	4	5			
	Tipo	I	II	III	IV	V				
	0,40	Rating	1	2	3	4	5			
	Formação	São (W ₁)	Ligeiramente alterado (W ₂)	Medianamente alterado (W ₃)	Muito alterado (W ₄)	Decomposto (W ₅)				
	0,50	0,30	Rating	1	2	3	4	5		
	Falhas	Existência	-	-	-	-				
	0,30	Rating	4 - 5	-	-	-	-			
Geológico-geomecânicos	Sistema RHRSm2	< 51	51 - 153	153 - 333	333 - 459	> 459	0,344			
	0,14 → 0,16	Blocos	1,0	Rating	1	2		3	4	5
	0,20	Q-System	40 - 1000	10 - 40	4 - 10	1 - 4		0,001 - 1		
	0,33	Rating	1	2	3	4		5		
	RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0				
	Sistemas de classificação (apenas um: Q, RMR ou SMR)	0,20	Rating	1	2	3		4	5	
	0,30	SMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21		20 - 0		
	0,33	Rating	1	2	3	4		5		
	Estado de conservação	0,35	Rating	1	2	3		4	5	
	Drenagem superficial	Estado de manutenção	Bom	Médio	Mau	-		-		
0,6 → 0,75	0,45	Rating	1	2	3	4	5			
Sistema de drenagem	0,11 → 0,12	Presença	Sim	Não	-	-	0,386			
	0,20	Rating	1 - 2	4 - 5	-	-				
	Drenagem profunda	Presença	Sim	Não	-	-				
	0,2 → 0,25	1,00	Rating	1 - 2	4 - 5	-		-		
Inspeções visuais	0,60	Estado de conservação	Muito bom	Bom	Médio	Mau	Muito mau	0,540		
	0,13 → 0,15	Rating	1	2	3	4	5			
	0,40	Classificação	Bom	Médio	Mau	-	-			
Historial	0,07 → 0,08	0,7 → 1,0	Queda de blocos	Nenhum	Inactivo	Alguns	Activo	Muito activo	0,080	
	0,25	Rating	1	2	3	4	5			
	Deslizamentos planares	Nenhum	Inactivo	Alguns	Activo	Muito activo				
	0,25	Rating	1	2	3	4	5			
	Deslizamentos de cunhas	Nenhum	Inactivo	Alguns	Activo	Muito activo				
	0,25	Rating	1	2	3	4	5			
	Deslizamentos circulares	Nenhum	Inactivo	Alguns	Activo	Muito activo				
	0,25	Rating	1	2	3	4	5			
	Tipo 2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5				
	0,60	Rating	5	4	3	2	1			
Zona sísmica	0,20	Tipo 1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5 - 1.6			
	0,40	Rating	5	4	3	2	1			
Ambientais / Tráfego	0,08 → 0,09	0,40	Precipitação média anual (mm)	< 100	100 - 500	500 - 1000	1000 - 2000	> 2000	0,254	
	0,50	Rating	1	2	3	4	5			
	Tráfego	Velocidade máxima (km/h)	< 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	> 80			
	0,15	Rating	1	2	3	4	5			
	Tráfego médio diário (TMD)	< 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	> 20				
	0,50	Rating	1	2	3	4	5			
	Construções	Material de construção	Betão armado	Alvenaria de pedra argamassada	Alvenaria de pedra não argamassada	Alvenaria de blocos de betão ou cerâmicos	Madeira			
	0,25	Rating	1	2	3	4	5			
	Número de edifícios	1	2	3	4	> 4				
	0,50	Rating	1	2	3	4	5			
Revestimento	0,10 → 0,11	0,80	Protecção superficial	< 25%	[25 - 50%[50%]50 - 75%]]75 - 100%]	0,462	
	0,20	Rating	5	4	3	2	1			
	Cobertura vegetal	Não existe	Pontual	Uniforme	-	-				
Sobrecarga	0,60	Rating	5	4 - 3	1 - 2	-	-	0,200		
	Imediações	Sim	Não	-	-	-				
	0,09 → 0,10	Vibrações nas proximidades	Sim	Não	-	-	-			
0,40	Rating	5	1	-	-	-				
VALOR DE SQI							2,6			

Quadro 38. Aplicação do índice SQI à zona geomecânica ZGM2 (Setor III).

SQI - ZGM2 (Setor III)								
Factores	Parâmetros	Categorias e ratings					Ratings Intermediários	
	Altura do talude (m)	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	> 40		
Geométricos	0,25 → 0,40	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto	0,570	
	Rating	1	2	3	4	5		
	Inclinação do talude (°)	< 30	30 - 40	41 - 50	51 - 60	> 60		
	0,35 → 0,60	Muito gradual	Gradual	Médio	Inclinado	Muito inclinado		
	Rating	1	2	3	4	5		
	Tipo	I	II	III	IV	V		
	0,40							
	Rating	1	2	3	4	5		
	Formação	São (W ₁)	Ligeiramente alterado (W ₂)	Medianamente alterado (W ₃)	Muito alterado (W ₄)	Decomposto (W ₅)		
	0,50	0,30						
	Rating	1	2	3	4	5		
	Falhas	Existência	-	-	-	-		
	0,30							
	Rating	4 - 5	-	-	-	-		
Geológico-geomecânicos	Sistema RHRSm2	< 51	51 - 153	153 - 333	333 - 459	> 459	0,391	
	0,14 → 0,16	1,0						
	Blocos							
	0,20	Rating	1	2	3	4	5	
	Q-System	40 - 1000	10 - 40	4 - 10	1 - 4	0,001 - 1		
	0,33	Rating	1	2	3	4	5	
	RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0		
	Sistemas de classificação (apenas um: Q, RMR ou SMR)	0,20						
	0,30	Rating	1	2	3	4	5	
	SMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0		
	0,33	Rating	1	2	3	4	5	
	Estado de conservação	Muito bom	Bom	Médio	Mau	Muito mau		
	0,35	Rating	1	2	3	4	5	
	Drenagem superficial	Bom	Médio	Mau	-	-		
	0,6 → 0,75	0,45						
	Rating	1	2	3	-	-		
Sistema de drenagem	0,11 → 0,12	Presença	Sim	Não	-	-	0,386	
	0,20	Rating	1 - 2	4 - 5	-	-		
	Drenagem profunda	0,2 → 0,25	1,00					
	0,2	Rating	1 - 2	4 - 5	-	-		
	Estado de conservação	Classificação	Muito bom	Bom	Médio	Mau	Muito mau	
Inspeções visuais	0,60	Rating	1	2	3	4	5	
0,13 → 0,15	0,40	Classificação	Bom	Médio	Mau	-	-	
	Estado de manutenção	Rating	1	2	3	-	-	
	0,25	Queda de blocos	Nenhum	Inactivo	Alguns	Activo	Muito activo	
	0,25	Rating	1	2	3	4	5	
	Deslizamentos planares	Nenhum	Inactivo	Alguns	Activo	Muito activo		
	0,25	Rating	1	2	3	4	5	
Historial	0,07 → 0,08	0,7 → 1,0	Deslizamentos de cunhas	Nenhum	Inactivo	Alguns	Activo	0,120
	0,25	Rating	1	2	3	4	5	
	Deslizamentos circulares	Nenhum	Inactivo	Alguns	Activo	Muito activo		
	0,25	Rating	1	2	3	4	5	
	Tipo 2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5		
	0,60	Rating	5	4	3	2	1	
Zona sísmica	0,20	Tipo 1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5 - 1.6	
	0,40	Rating	5	4	3	2	1	
	Precipitação média anual (mm)	< 100	100 - 500	500 - 1000	1000 - 2000	> 2000		
	0,40	Rating	1	2	3	4	5	
Ambientais / Tráfego	0,08 → 0,09	Velocidade máxima (km/h)	< 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	> 80	0,254
	0,50	Rating	1	2	3	4	5	
	Tráfego	0,15	Tráfego médio diário (TMD)	< 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	> 20
	0,50	Rating	1	2	3	4	5	
	Material de construção	Betão armado	Alvenaria de pedra argamassada	Alvenaria de pedra não argamassada	Alvenaria de blocos de betão ou cerâmicos	Madeira		
	0,50	Rating	1	2	3	4	5	
	Número de edifícios	1	2	3	4	> 4		
	0,50	Rating	1	2	3	4	5	
	Protecção superficial	< 25%	[25 - 50%[	50%	]50 - 75%]	]75 - 100%]	
	0,80	Rating	5	4	3	2	1	
Revestimento	0,10 → 0,11	Cobertura vegetal	Não existe	Pontual	Uniforme	-	-	0,484
	0,20	Rating	5	4 - 3	1 - 2	-	-	
	Sobrecarga	0,60	Sim	Não	-	-	-	
	0,60	Rating	5	1	-	-	-	
Imediações	0,09 → 0,10	Vibrações nas proximidades	Sim	Não	-	-	-	0,200
	0,40	Rating	5	1	-	-	-	
	Rating	5	1	-	-	-	-	
VALOR DE SQI							2,9	

No quadro 39 apresenta-se a síntese dos resultados dos dois métodos aplicados às zonas geomecânicas ZGM0, ZGM1 e ZGM2 definidas, anteriormente, para a vertente de S. Simão.

Quadro 39. Síntese das características das zonas geomecânicas ZGM0, ZGM1 e ZGM2 da vertente de S. Simão, de acordo com as classificações RHRSm2 e SQI.

Zonas geomecânicas / Sistema_Índice	Rockfall Hazard Rating System (RHRSm2) <i>(Pierson et al., 1990; Budetta, 2004; Pinheiro et al., 2014, 2015)</i>	Slope Quality Index (SQI) <i>(Pinheiro et al., 2014, 2015)</i>
ZGM0_a (Sector V)	234	não determinado
	Grau de susceptibilidade: moderado Intervenção: curto-médio prazo	
ZGM0_b (Sector II)	186	não determinado
	Grau de susceptibilidade: moderado-baixo Intervenção: curto-médio prazo	
ZGM1 (Sector I e IV)	210	2,6
	Grau de susceptibilidade: moderado Intervenção: curto-médio prazo	Estado da vertente: mediano-bom Nível de perigosidade: moderado-baixo
ZGM2 (Sector III)	348	2,9
	Grau de susceptibilidade: moderado-elevado Intervenção: curto prazo-urgente	Estado da vertente: mediano Nível de perigosidade: moderado

Em ambas as análises, a zona geomecânica mais crítica é a ZGM2, a qual, como se referiu, engloba o setor III da vertente de S. Simão.

A figura 40 ilustra a cartografia dos resultados obtidos para os dois métodos, RHRSm2 e SQI, na vertente de S. Simão.

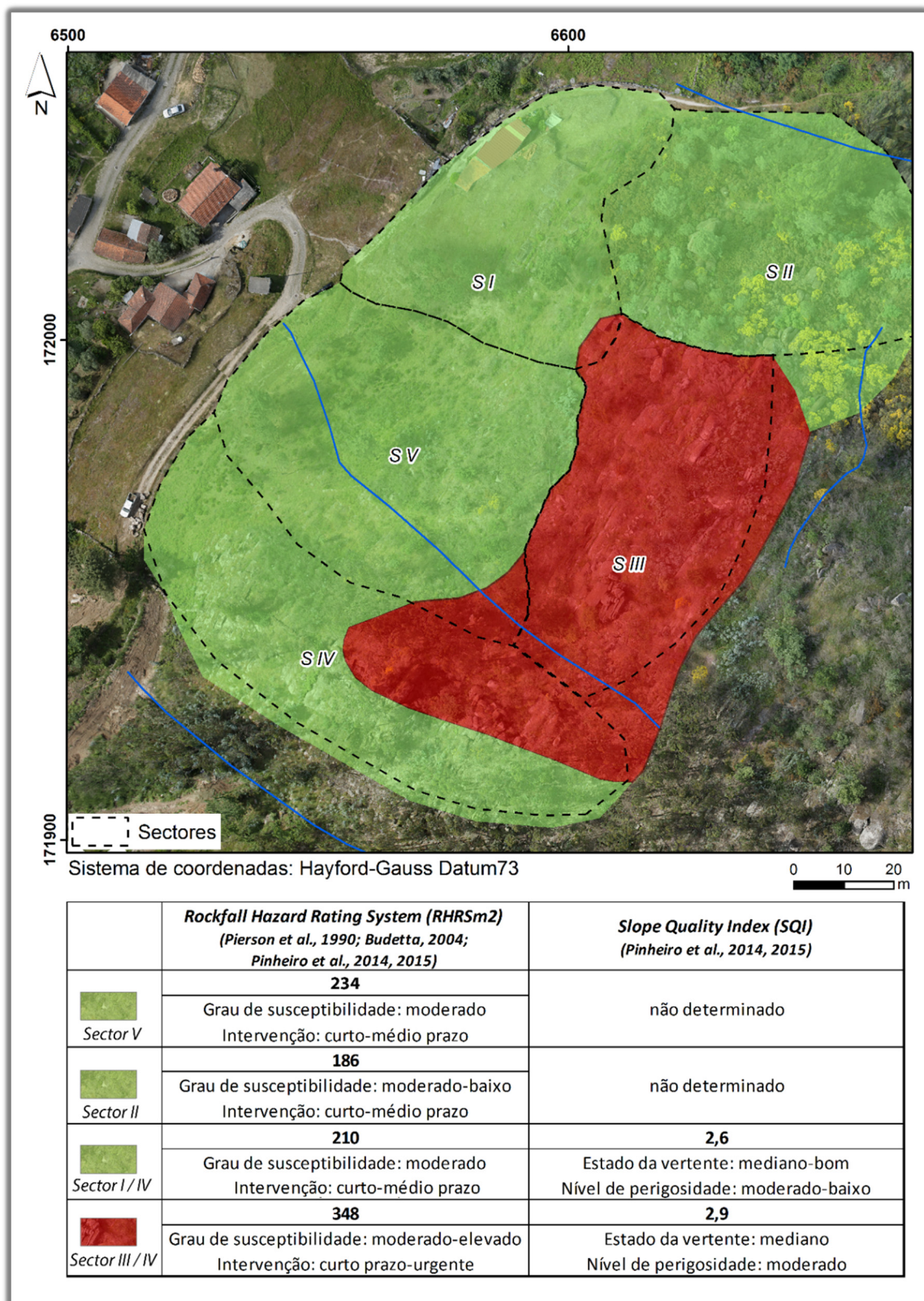


Figura 40. Cartografia da suscetibilidade e grau de perigosidade para a vertente de S. Simão.

4.7.6. Inspeção e Inventário de Blocos Instáveis

Embora a vertente envolva uma área assinalável e os afloramentos rochosos ocupem uma significativa percentagem dessa área, entendeu-se possível e pertinente a inspeção detalhada da vertente, identificando, inventariando, classificando e hierarquizando os blocos rochosos potencialmente instáveis (pormenores em Pacheco, 2015; NEC & LABCARGA, 2015). Definiu-se, nesse sentido, uma ficha de inspeção por bloco rochoso potencialmente instável (Anexo III).

Registaram-se para cada bloco identificado, a forma, as dimensões, a litologia, o grau de alteração, o grau de fracturação e a classe de resistência. Regista-se, ainda, se o bloco se encontra ou não isolado, tal como referido anteriormente (NEC & LABCARGA, 2015):

- Se o bloco não é isolado (atribuindo-se a designação BL) será necessário caracterizar as descontinuidades e indicar qual o tipo de instabilidade potencial.
- Se o bloco é isolado (atribuindo-se a designação BI) é importante caracterizar a sua superfície de apoio, a inclinação que esta apresenta e se é observada a presença de vegetação e (ou) de água.

Para cada bloco deverão também identificar-se as anomalias associadas, sendo as mais comuns a presença de descontinuidades e a sua abertura, o descalçamento, a presença de vegetação com efeito estabilizador, o deslocamento dos blocos, a presença de blocos com efeito estabilizador e a presença de água nas descontinuidades ou na base dos blocos. As anomalias deverão ser classificadas, de acordo com uma metodologia adaptada da utilizada pela Infraestruturas de Portugal, EP, de modo a avaliar o respetivo nível de gravidade.

A classificação a atribuir a uma determinada anomalia observada é obtida somando as pontuações parciais relativas:

- à caracterização da anomalia, à qual se atribui uma pontuação de 0 a 3, resultante da soma das pontuações atribuídas à natureza da anomalia, ao seu desenvolvimento e à sua extensão, de acordo com o quadro 40.

Quadro 40. Caracterização da anomalia.

<i>Anomalia</i>	<i>Caracterização da anomalia</i>		
	<i>Natureza</i>	<i>Desenvolvimento</i>	<i>Extensão</i>
<i>0</i>	<i>Pouco grave</i>	<i>Limitado e estável</i>	<i><50% do admissível</i>
<i>1</i>	<i>Grave</i>	<i>Significativo ou em evolução</i>	<i>>50% do admissível</i>

- à consequência da anomalia, à qual se atribui uma classificação que varia entre 0 e 1: consequência local – 0; consequência global – 1.

Deste modo, esta classificação pode resultar num nível de gravidade, NGA, que varia entre 0 e 4 (quadro 41).

Quadro 41. Caracterização da anomalia e obtenção do nível de gravidade.

Anomalia	Caracterização da anomalia			Consequência	NGA
	Natureza	Desenvolvimento	Extensão		
0	Pouco grave	Limitado e estável	<50% do admissível	Local	
1	Grave	Significativo ou em evolução	>50% do admissível	Global	

No caso de existir mais do que uma tipologia de anomalia no mesmo bloco, com a mesma classificação, o nível de gravidade final das anomalias deverá resultar de uma ponderação, de modo a que seja possível incrementar a gravidade inerente ao bloco. Com esse fim, definiu-se a classificação final do nível de gravidade das anomalias, após a ponderação, NGA', a partir das relações expressas no quadro 42.

Quadro 42. Nível de gravidade final das anomalias.

Nível de gravidade inicial da anomalia NGA	Nº de anomalias, no bloco, com maior NGA	Nível de gravidade final das anomalias NGA'
0	-	0
1	<4	1
	≥4	2
2	<3	2
	≥3	3
3	<2	3
	≥2	4
4	-	4

No caso de existir uma ou mais anomalias de grau 4, no bloco em análise, não será necessária esta ponderação, obviamente, uma vez que já foi atingido o valor máximo.

Uma vez determinada a classificação final do nível de gravidade das anomalias (NGA'), será importante caracterizar o nível de gravidade do bloco (NGB).

Nesta caracterização são incluídos campos adicionais, nomeadamente (NEC & LABCARGA, 2015):

- a caracterização do bloco:
 - - avaliação qualitativa do seu peso;
 - - identificação da sua forma;

- o nível de instabilidade potencial;
- a caracterização da superfície da trajetória:
 - - quanto à sua inclinação;
 - - quanto à percentagem aproximada de cobertura com solo.

Todos os parâmetros avaliados poderão ter uma classificação atribuída, que varia entre 1 e 3, de acordo com o contributo que representa para a gravidade. Na classificação do nível de gravidade do bloco deverá ainda ser contabilizada a classificação final do nível de gravidade das anomalias (NGA').

A expressão seguinte traduz a classificação final do nível de gravidade do bloco.

$$NGB = \sum_i^n P + NGA'$$

Em que:

P são os diversos parâmetros avaliados.

O nível de gravidade do bloco (NGB) estará compreendido num intervalo que varia entre 5, no mínimo e 19, no máximo. Com este sistema de avaliação é possível hierarquizar os blocos, de acordo com a perigosidade que representam (quadro 42).

Quadro 43. Hierarquização segundo o nível de gravidade (NEC & LABCARGA, 2015).

NGB	Nível de gravidade
5 a 8	Baixo
9 a 12	Médio
13 a 16	Elevado
17 a 19	Muito elevado

Realizada a inspeção detalhada da vertente de S. Simão, identificaram-se os sectores e os blocos rochosos a que se associam maiores níveis de gravidade (quadros 44 e 45).

Quadro 44. Avaliação do sector mais problemático.

Sector	Nº de blocos com um nível de gravidade do bloco compreendido entre:			
	5 a 8	9 a 12	13 a 16	17 a 19
1	0	1	2	0
2	0	1	1	0
3	0	0	5	0
4	0	1	0	0
5	0	0	0	0

Quadro 45. Hierarquização dos blocos por nível de gravidade.

Hierarquização dos blocos por nível de gravidade	Sector	Bloco	NGB	Nível de gravidade
1º	3	BL5	16	Elevado
2º	3	BL6	15	Elevado
3º	3	BL7	15	Elevado
4º	1	BL2	14	Elevado
5º	3	BL4	14	Elevado
6º	2	BL2	14	Elevado
7º	3	BL5	13	Elevado
8º	1	BL1	13	Elevado
9º	2	BL1	11	Médio
10º	1	BL4	11	Médio
11º	4	BL6	10	Médio

No Anexo III apresentam-se as fichas de inspeção dos blocos seleccionados.

Verifica-se que o Setor III é o que apresenta o maior número de blocos potencialmente instáveis (5), sendo também o que contém um maior número de blocos com maior nível de gravidade (elevado) (figura 41). O bloco rochoso que atingiu a habitação em 2004 terá também tido origem neste setor, de acordo com testemunhos recolhidos junto dos habitantes das moradias localizadas no sopé da vertente.

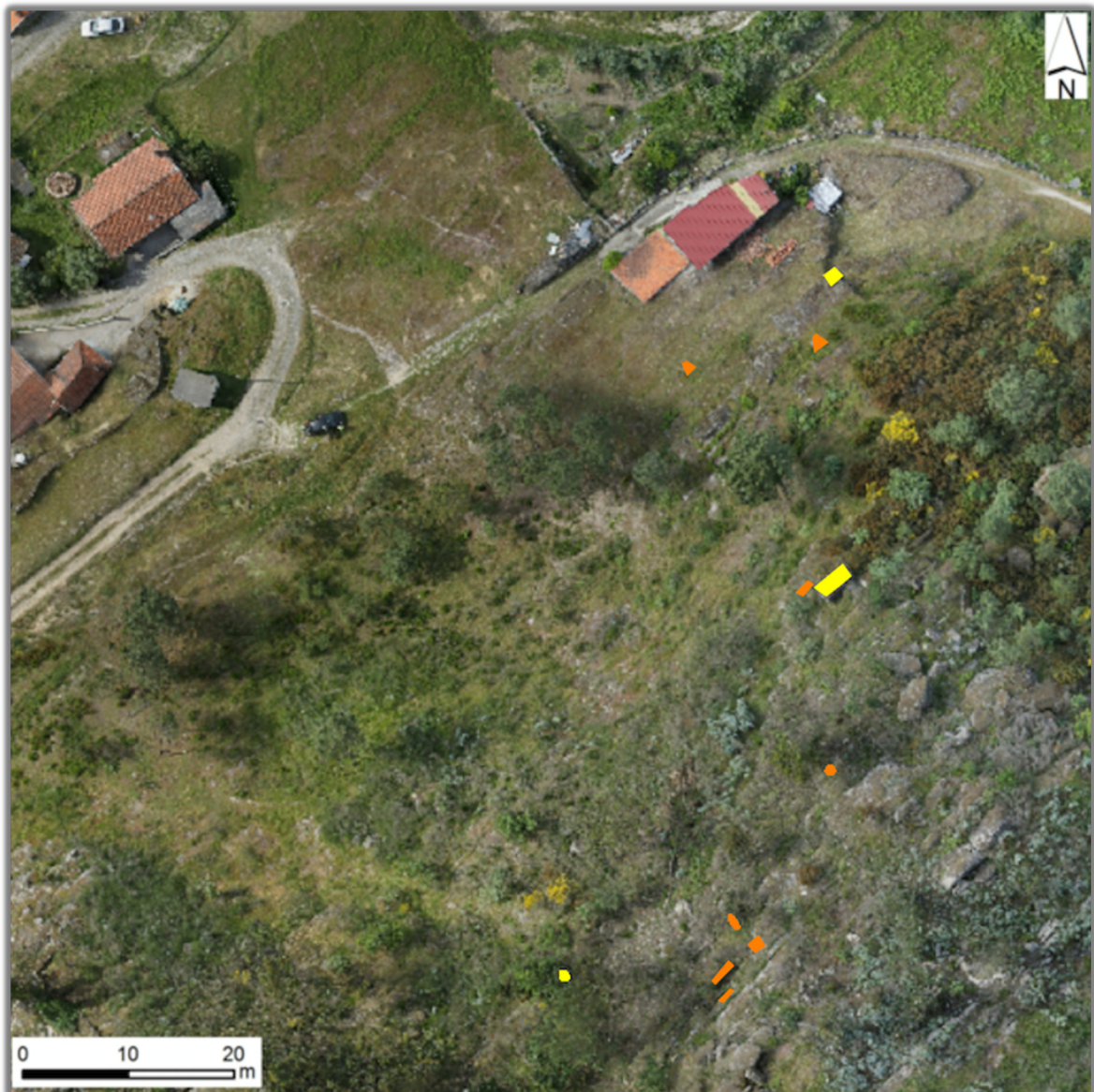


Figura 41. Representação do nível de gravidade dos blocos inspecionados na vertente de S. Simão (NEC & LABCARGA, 2015).

A figura 42 ilustra o nível de gravidade dos blocos inspecionados na cartografia da suscetibilidade e grau de perigosidade na vertente de S. Simão. Verifica-se que a maioria dos blocos com um nível de gravidade elevado se localiza nas zonas em que a suscetibilidade e o nível de perigosidade da vertente são mais elevados.

Apenas dois blocos isolados, com nível de gravidade elevado, se encontram numa zona de menores níveis de suscetibilidade e de perigosidade. Estes blocos serão, certamente, oriundos de outro setor, e na solução de estabilização é preconizado o seu saneamento (NEC & LABCARGA, 2015).

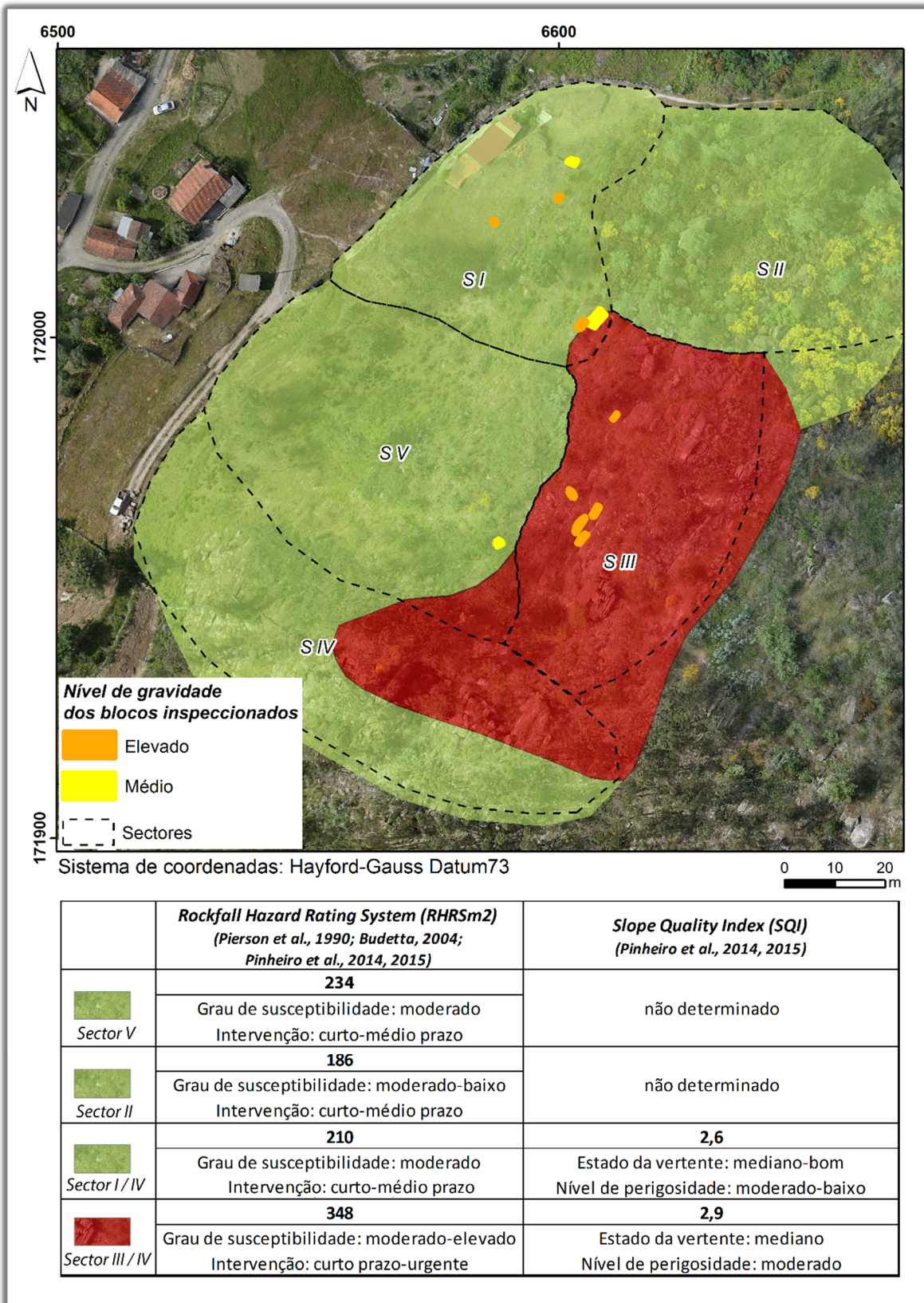


Figura 42. Representação da gravidade dos blocos inspeccionados versus a suscetibilidade e grau de perigosidade na vertente de S. Simão.

4.7.7. Modelação Geotécnica de Quedas de Blocos (RocFall): Exemplo de Simulação de Quedas e Trajetórias

O estudo das vertentes rochosas e a sua estabilização é um tema que se reproduz, frequentemente, no território nacional, associado geralmente à presença de vias de comunicação ou de aglomerados habitacionais. Constitui um exemplo típico em que se poderá conjugar uma associação entre a engenharia civil e a engenharia geotécnica. As modelações com recurso a programas de cálculo automático representam, cada vez mais, uma ferramenta muito útil, versátil e fiável na análise de diferentes intervenções na área da engenharia. Este estudo não foi exceção, tendo-se recorrido à utilização de um programa de cálculo automático que permite simular a queda de blocos.

Esta modelação da queda de blocos rochosos com recurso ao programa de cálculo automático designado *Rocfall 5.0*, da empresa *RocScience*, representa uma mais-valia no estudo de blocos instáveis em vertentes rochosas de vários tipos, mostrando-se fulcral em situações onde se verificam declives bastante acentuados e a instabilidade dos blocos representa um risco para as populações. Com este programa de cálculo automático é possível analisar as trajetórias de blocos rochosos que se encontram em queda e identificar as suas características ao longo desses percursos, tornando-se uma ferramenta de fácil aplicação e perceção. No caso específico da vertente rochosa de S. Simão, os elementos que se pretendem proteger das eventuais quedas de blocos são um conjunto de habitações localizadas na base da vertente, bem como os caminhos que lhe dão acesso.

Recorreu-se, então, à modelação dos blocos instáveis, detetados ao longo da vertente, com recurso ao programa *Rocfall 5.0*, selecionando-os de acordo com a hierarquização proposta na inspeção da vertente, referida anteriormente. O *Rocfall 5.0* modela bidimensionalmente a trajetória de blocos rochosos, permitindo a consideração de uma amostra significativa de blocos e diferentes secções de origem, com ou sem velocidade inicial. São introduzidos os parâmetros que caracterizam a vertente, onde se incluem as dimensões do bloco e a respetiva forma.

A primeira tarefa consiste, assim, na definição das trajetórias tridimensionais associadas aos diferentes blocos selecionados. Em cada uma dessas trajetórias deverão identificar-se os materiais sobre os quais rolarão os blocos – neste caso particular solo com vegetação, afloramento rochoso ou caminho revestido com cubos de granito.

Este estudo foi realizado com o apoio do modelo tridimensional produzido e com sucessivas visitas à vertente para validação das informações obtidas. Após a definição das diferentes trajetórias no modelo tridimensional, procedeu-se à sua adaptação a duas dimensões para a análise com o programa *Rocfall 5.0* (figura 43).

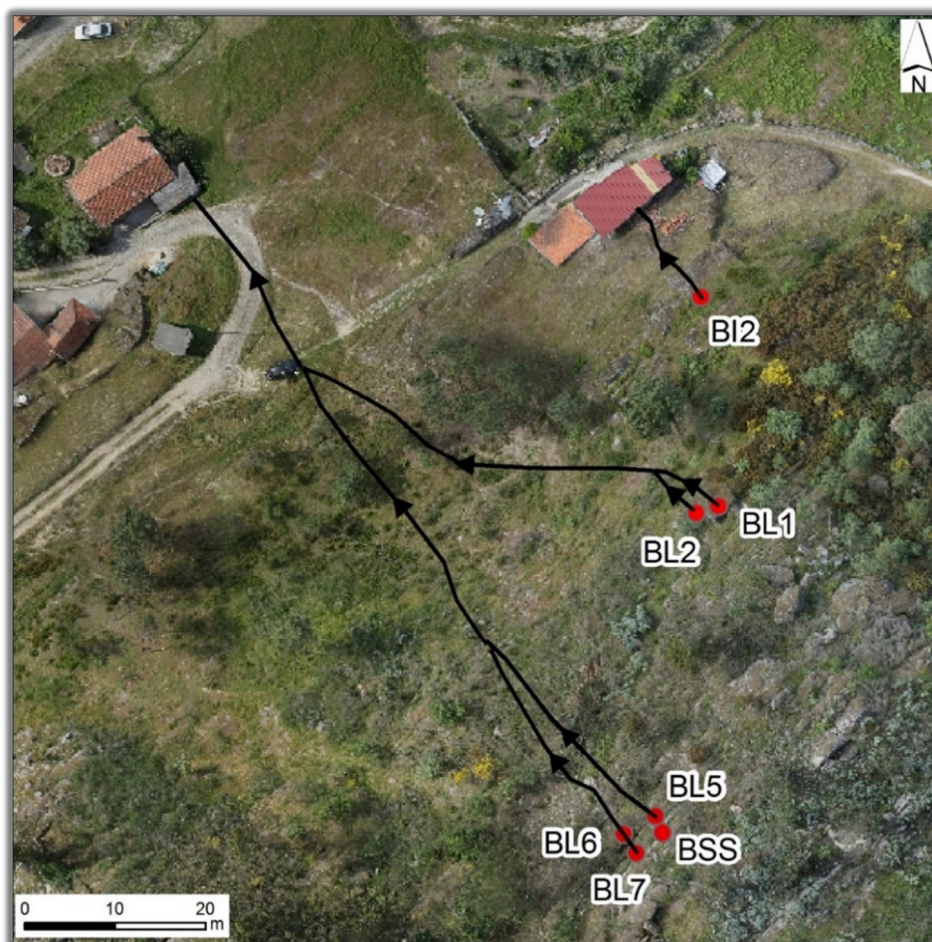


Figura 43. Trajetórias obtidas através do modelo tridimensional (adaptado de Pacheco, 2015; NEC & LABCARGA, 2015).

Para cada material atravessado deverão definir-se seis parâmetros:

- I. Coeficiente de restituição normal (r_n);
- II. Coeficiente de restituição tangencial (r_t);
- III. Coeficiente de atrito dinâmico, igual à tangente do ângulo de atrito interno do terreno ($tg\phi$);
- IV. Coeficiente de resistência ao rolamento (r_r);
- V. Amplitude da rugosidade do talude (a);
- VI. Espaçamento da rugosidade do talude (s).

Para os três materiais identificados (solo com vegetação, afloramento rochoso ou caminho revestido com cubos de granito) definiram-se, inicialmente, valores mínimos, máximos e médios dos quatro primeiros parâmetros (r_n , r_t , $tg\phi$, r_r), com base nas referências disponibilizadas pela

RocScience, bem como na bibliografia da especialidade (e.g., Hoek & Bray, 1981; Wyllie, 2014). Considerou-se uma função normal de distribuição de probabilidade para todos os parâmetros, tendo-se definido o respetivo desvio padrão igual a 1/6 da diferença entre os correspondentes valores máximo e mínimo. Face ao detalhe com que foram caracterizadas as trajetórias dos blocos, não se considerou a amplitude da rugosidade, nem o respetivo espaçamento. No quadro 46 apresentam-se os valores definidos, inicialmente, para estes parâmetros.

Quadro 46. Características dos três tipos de terrenos atravessados.

Terreno	r_n		r_t		$tg\phi$		r_r		a	s
	\bar{r}_n	σ	\bar{r}_t	σ	$\overline{tg\phi}$	σ	\bar{r}_r	σ		
Solo com vegetação	0,3215	0,0238	0,690	0,0467	0,3670	0,0330	0,520	0,0433	-	-
Afloramento rochoso	0,4300	0,0330	0,910	0,0267	1,0155	0,0588	0,855	0,1517	-	-
Caminho com cubos de granito	0,3950	0,0083	0,895	0,00833	0,8500	0,0500	0,425	0,00833	-	-

4.7.8. Imagem Aérea da Vertente de S. Simão: Veículo Aéreo Não Tripulado (Drone)

Para a definição do modelo tridimensional foi determinante a utilização de um veículo aéreo não tripulado, mais conhecido por *drone*, para a obtenção de uma imagem aérea de alta qualidade de toda e vertente.

O veículo aéreo não tripulado foi disponibilizado, tal como referido anteriormente, pela empresa SkyCam, sendo este um modelo montado, preparado e movimentado pelos operadores da própria empresa. Estava equipado com uma máquina fotográfica Canon 70d e no total foram realizados três voos, o que permitiu assegurar uma sobreposição das imagens de 70%. Para além desta caracterização com recurso à imagem aérea foi ainda utilizado um GPS Trimble GeoExplorer GeoXH2005, disponibilizado pelo LABCARGALISEP, que permitiu georreferenciar os vários blocos identificados como instáveis ao longo da vertente para que posteriormente fossem identificados corretamente nos seus locais na respetiva imagem aérea.

O conjunto das imagens obtidas foi tratado com um programa de cálculo automático, que permitiu dessa forma que se gerasse um modelo tridimensional da vertente com bastante precisão, o que conferiu uma base de trabalho fulcral para a modelação com o *Rocfall 5.0* (na definição das trajetórias dos blocos) e para diferentes análises posteriores da vertente rochosa.

4.7.9. Modelação da Queda de Blocos

Apenas como exemplo, apresenta-se a modelação do bloco BL5 (figura 44), tendo-se verificado que um número significativo dos 1500 blocos lançados ainda atingiria a habitação existente na base da vertente.

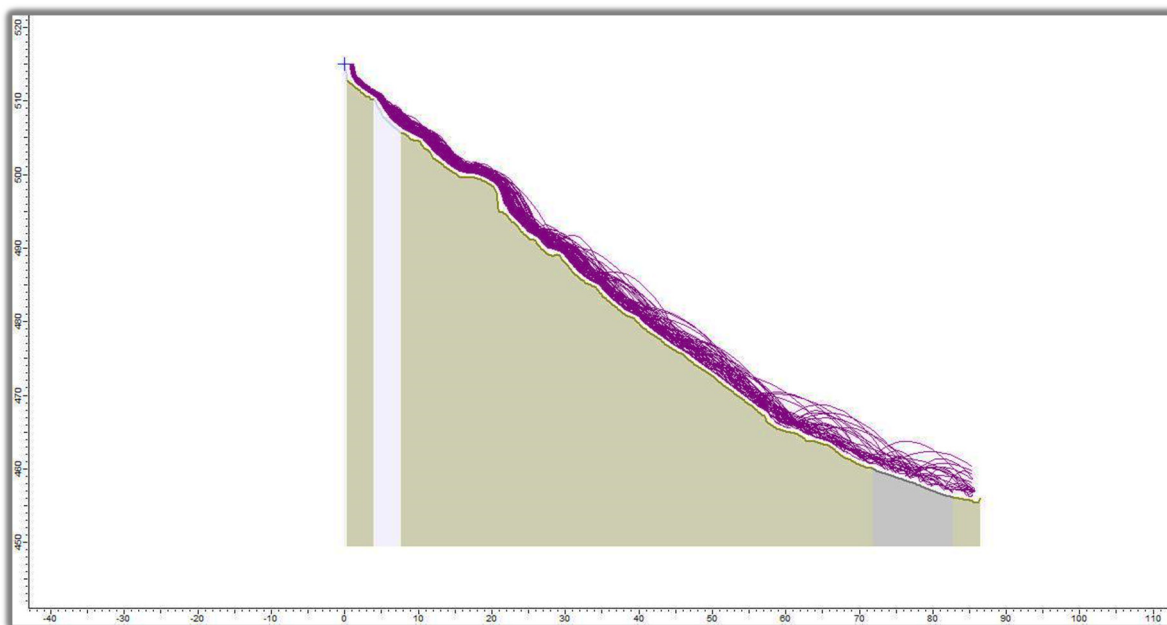


Figura 44. Simulação da trajetória do bloco BL5.

4.7.10. Proposta de Solução Final: Breve Síntese

A geometria da vertente, que representa uma grande inclinação, a posição das habitações em relação a essa mesma vertente e os caminhos no respetivo sopé, a presença de uma densa mancha de árvores em crescimento e a existência de uma linha de talvegue acentuada permitiram, desde cedo, perspetivar a conceção de uma solução de reforço e de proteção que deveria incluir, entre outras medidas não menos importantes, o recalçamento de alguns blocos instáveis e a instalação de uma linha de barreiras flexíveis na base da vertente.

Para a proteção das habitações que se encontram no sopé da vertente rochosa e do caminho que lhes dá acesso, sugerem-se, assim, as seguintes medidas (pormenores em NEC & LABCARGA, 2015):

- I. A desmatação das giestas secas presentes na vertente;
- II. O saneamento de diversos blocos rochosos que se encontram ao longo da vertente e que já terão rolado de cotas superiores;
- III. A colocação de recalçamentos em alguns blocos rochosos;
- IV. A instalação de uma barreira flexível no sopé da vertente;

- V. A plantação de mais árvores e a preservação do conjunto existente;
- VI. A criação e a manutenção periódica de corta-fogos entre a vertente e a mata adjacente;
- VII. A identificação de árvores localizadas junto a blocos rochosos e que constituam, relativamente a estes, um potencial fator de instabilização, o seu corte e desvitalização.

Na figura 45 apresenta-se a modelação da queda do bloco BL2, considerando instalada a barreira flexível (figura 46), verificando-se que apenas quatro das rochas lançadas (quatro por mil) não são retidas pela barreira.

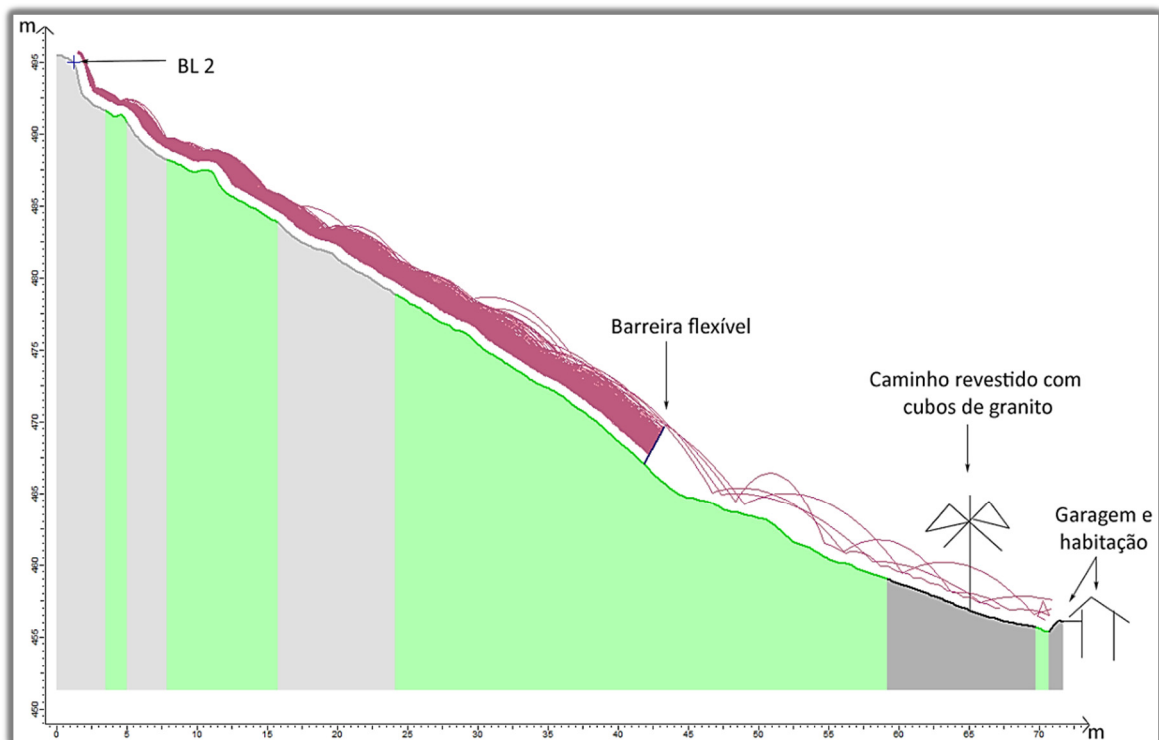


Figura 45. Modelação do bloco rochoso BL2 com a barreira flexível instalada (adaptado de NEC & LABCARGA, 2015).

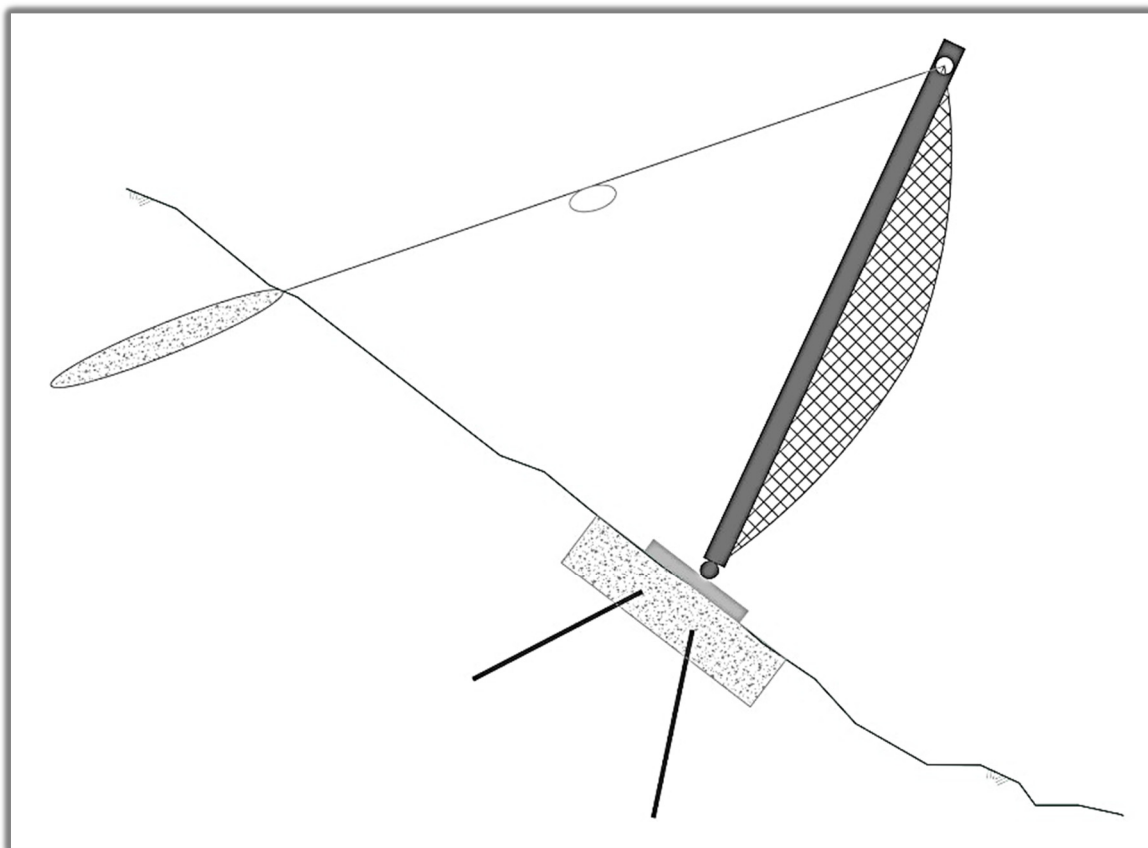


Figura 46. Exemplificação de um corte transversal esquemático da barreira flexível proposta para a vertente de S. Simão (adaptado de NEC & LABCARGA, 2015).

A plantação de mais árvores e a preservação do conjunto existente permitirá criar barreiras naturais, a montante da barreira flexível, que contribuirão para o controlo da energia dos blocos rochosos em queda.

4.7.11. Considerações Finais

Apresentadas todas estas metodologias e técnicas de caracterização da vertente rochosa de S. Simão foi possível conhecer na totalidade a referida vertente e dessa forma partir para uma outra etapa, não menos importante, que se desenvolve partindo da base apresentada neste tópico e que resultará numa proposta de solução final e respetivos apontamentos de prevenção de riscos de queda de blocos.

Com as diversas adaptações às classificações apresentadas foi possível obter resultados mais próximos da realidade desta vertente, e não apenas resultados extrapolados, sem nunca descurar a validade destas classificações, atestando também a possibilidade de novas adaptações das mesmas numa eventual situação que se assemelhe a esta em termos de risco de queda de blocos.

5

Conclusões

(Página propositadamente em branco)

5. Conclusões

5.1. *Considerações Finais*

A elaboração deste trabalho teve como principal objetivo demonstrar todo o processo de trabalho que envolve uma análise da estabilidade de uma vertente rochosa numa perspetiva da avaliação da perigosidade geotécnica. Sendo possível verificar todo o seu desenvolvimento e metodologia na intervenção no terreno, na inspeção, na classificação geomecânica e na modelação geotécnica e dessa forma, na obtenção de uma solução de proteção e estabilização da vertente.

Este estudo, como já mencionado, foi realizado da freguesia de S. Simão, concelho de Amarante, onde, segundo o seu historial, já teria ocorrido a queda de um bloco rochoso proveniente dessa mesma vertente e cujo bloco acabaria por embater na garagem de uma habitação, localizada no sopé da vertente rochosa. A data do acidente decorreu entre finais de Julho e inícios de Agosto de 2004.

Numa fase inicial, o processo esteve envolto na recolha de informações existentes acerca da vertente rochosa, recolha de elementos bibliográficos, dados sobre o acidente ocorrido, bem como historial climatológico e sismológico, preparando desta forma as intervenções a realizar na fase de campo.

As primeiras visitas ao local de intervenção apenas tiveram como objetivo o reconhecimento cartográfico e a verificação dos afloramentos rochosos, a divisão por setores de intervenção em função do acesso e estado desses mesmos afloramentos rochosos; consistiu, ainda, na verificação das zonas com blocos individualizados, no fundo, nesta fase, serviu para conhecer profundamente a vertente rochosa em que se iria trabalhar.

Com esta primeira fase de estudo de campo concluída foi possível intervir posteriormente no local de acordo com as divisões já realizadas e aplicar a técnica de amostragem linear (“scanlines”) para classificação do maciço rochoso e da respetiva cartografia de zonamento geotécnico. Para além da aplicação desse método também se recorreu de forma sistemática a

ensaios de campo, recorrendo ao esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt – tipo L), da resistência do material-rocha em afloramento.

Na fase de gabinete foi possível reunir devidamente todos os dados, tendo sempre em conta a divisão por setores e os diferentes perfis que constavam em cada um deles. Numa fase seguinte agruparam-se todos os dados de forma a caracterizar todos os setores de acordo com os critérios a preencher nas fichas de campo. Esta recolha exaustiva de dados, bem como análise estatística dos mesmos permitiu aplicar as diferentes classificações geomecânicas mais genéricas (RMR, GSI) e posteriormente as classificações específicas (SMR, RHRSm2, SQI) do estudo de vertentes rochosas.

Particularmente analisando as características do local podem apresentar-se as seguintes conclusões gerais.

Geologicamente, o local é constituído por um granito porfíroide de grão grosseiro, essencialmente biotítico, com um grau de alteração, na sua maioria, a variar de pouco a medianamente alterado (W_{1-2} a W_3), cor cinzenta-esbranquiçada, por vezes um pouco rosada (devido à dominância de megacristais de feldspato potássico).

Relativamente ao zonamento geotécnico definido na área em estudo podem ser consideradas as seguintes unidades:

- I. ZG0 - esta zona geotécnica é composta por blocos rochosos imbricados e/ou isolados na vertente de S. Simão;
- II. ZGI – definida no setor IV da vertente de S. Simão, caracterizou-se como sendo um granito medianamente alterado (W_3), com espaçamentos afastados (F_{1-2}), $RQD_{teórico}$ na ordem dos 65 a 75% e resistência à compressão uniaxial estimada entre $\approx 30 - 45\text{MPa}$ (S_3).
- III. ZGII - definida no setor I da vertente de S. Simão, caracterizou-se como sendo constituída por um granito medianamente alterado (W_3) a pouco alterado (W_{1-2}), com espaçamentos afastados (F_{1-2}), $RQD_{teórico}$ na ordem dos 70 a 80% e resistência à compressão uniaxial estimada entre $\approx 35 - 55\text{MPa}$ (S_3);
- IV. ZGIII – definida no setor III da vertente de S. Simão, caracterizou-se como sendo um granito pouco alterado (W_{1-2}), com espaçamentos afastados (F_{1-2}) a próximos (F_{4-5}), $RQD_{teórico}$ na ordem dos 55 a 70% e resistência à compressão uniaxial estimada entre $\approx 30 - 40\text{MPa}$ (S_3);

Relativamente ao estudo geomecânico, este permitiu elaborar uma cartografia geomecânica composta por duas zonas, ZGM1 e ZGM2:

-
- I. ZGM1 – boa a razoável qualidade geomecânica (SMR = 71-76; RMR₈₉ = 50-62; GSI₂₀₁₃ = 58);
 - II. ZGM2 – fraca qualidade geomecânica (SMR = 33; RMR₈₉ = 42; GSI₂₀₁₃ = 43).

Fazendo uma análise específica de acordo com a classificação SMR - *Slope Mass Rating*, os setores I e IV são considerados estáveis, em contraponto, o setor III é considerado um setor instável. Analisando os tipos de roturas prováveis para cada um dos setores, de acordo com a classificação SMR, é de salientar o facto dos setores I e IV não se encontrarem num estado de previsão de ocorrência de fenómenos de instabilidade, em oposição, no setor III será de prever a ocorrência de vários problemas de instabilidade, especificamente, ocorrência de roturas em cunha e planares e também tombamentos. A análise geoestrutural da estabilidade aplicando o “Teste de Markland”, relativamente aos setores I e III, permite verificar que a família principal de descontinuidades pode dar origem a roturas por tombamento, verificando-se o facto de estas descontinuidades apresentarem uma inclinação contrária à inclinação do setor e uma direção sub-paralela em relação ao mesmo.

A aplicação das classificações mais específicas e que se relacionam inteiramente com esta problemática do risco de queda de blocos em vertentes rochosas, permitiu avaliar a suscetibilidade e o nível de perigosidade da vertente de S. Simão, sendo o método RHRSm2 – *Rockfall Hazard Rating System* (RHRS adaptado), e SQI – *Slope Quality Index*, aqueles que foram aplicados e permitiram concluir que o setor com maior nível de alarmismo foi o setor III, requerendo uma intervenção a curto prazo.

Revolvendo o historial já referido anteriormente e que despontou para a necessidade deste estudo, a queda de um bloco que atingiu uma habitação entre os finais de Julho e inícios de Agosto no lugar do Casal, terá tido a sua origem no referido setor III localizado na vertente rochosa de S. Simão, baseando essa informação nas diversas referências feitas pelos moradores locais. Essa queda poderá ter sido resultado da ação conjunta de vários elementos, principalmente, os declives bastante acentuados e característicos da vertente, a ocorrência de um sismo de baixa magnitude registado nessa altura e da elevada precipitação no período referido, algo anormal para aquela altura do ano. Estas referências, associadas às características geotécnicas em termos de compartimentação do maciço rochoso e da instabilidade estrutural, poderão contribuir para a queda de outros blocos identificados na vertente de S. Simão.

A inspeção da vertente realizada de forma bastante detalhada, criteriosa e metodológica permitiu identificar um conjunto de blocos potencialmente instáveis, que foram hierarquizados de acordo com uma metodologia proposta para a definição do respetivo nível de gravidade. Desta forma, os blocos com maior nível de gravidade localizam-se, principalmente, no setor III, embora também se

tenham identificados alguns blocos potencialmente instáveis nos setores I, II e IV. Algo fundamental a ter em conta no planeamento e elaboração da solução de estabilização e proteção.

A solução de proteção deverá conter, para além do elemento físico proposto e dimensionado, um conjunto de interações também elas fundamentais para a estabilização da vertente, sendo eles novamente referidos como o saneamento dos blocos, recalçamento de outros com enrocamento argamassado, manutenção da cobertura vegetal, criação de corta-fogos e a desvitalização de alguns exemplares arbóreos e arbustivos, que se localizam junto aos blocos rochosos. Estas medidas são complementares à solução de proteção final que seria a instalação de barreiras flexíveis no sopé da vertente, resultando todo este sistema num complexo sistema de estabilização.

5.2. Perspetivas Futuras e Recomendações

Esboçando uma retroanálise crítica, e em simultâneo em jeito de sugestões, em relação a todo este processo de desenvolvimento de uma investigação em contexto real, muito comum no que toca à existência de casos idênticos, mas pouco comum em relação à tipologia de abordagem dado que o estudo geotécnico foi realizado em vertentes rochosas. Com efeito, serão apresentados alguns apontamentos relativamente a recomendações e perspetivas futuras para esta área de abordagem relacionada com a temática da perigosidade geotécnica de queda de blocos rochosos em taludes de vertentes naturais.

Uma das principais conclusões e ideias retidas desde o início de todo o processo de investigação “in situ”, reconhecimento e inspeção do local prendeu-se essencialmente na importância destas abordagens. A investigação do local permite estar a par de todo o historial da zona em termos de dinâmica de quedas de blocos rochosos, do local ou locais específicos, e essa mesma informação poderá ser fulcral para a obtenção dos resultados e análises finais. A visualização do local e da sua envolvente, em termos de reconhecimento cartográfico e inspeção, aliado à competência dos profissionais que a realizam, é talvez o processo mais importante de todo este trabalho. É nesta fase que se determinam a divisão de zonas com suscetibilidades distintas, tipos de abordagens, ideias possíveis para a abordagem a implementar, e uma série de outras situações que vão surgindo à medida que a investigação e a inspeção avançam. No fundo, do exposto resultará os vários estádios de conceptualização geotécnica que irão desde as fases preliminares dos modelos básicos (modelação geológica e geomorfológica de engenharia e modelação geotécnica) até às fases mais avançadas dos modelos numéricos (modelação geomecânica comportamental). Em suma, a síntese do exposto levará à proposta da solução técnica mais equilibrada, em termos de segurança, de dimensionamento e de custos, da proteção a aplicar.

Por outro lado, a facilidade de aplicação e a possibilidade de adaptação das classificações SQI e RHRSm2, sem alterar a sua génese fundamental, permitiu verificar que, por vezes, a rigidez das classificações poderão ser um entrave, que neste caso, se conseguiu contornar com a referida adaptação das mesmas.

Desta forma surgiram as seguintes recomendações e perspetivas para a execução de trabalhos futuros:

- I. Sistematização da primeira análise ao local, ou seja, existirem uma série de parâmetros-base que fossem obrigatórios a cumprir nas primeiras visitas, e, se possível, indicar diferentes tipos de abordagens a seguir;
- II. Proposta de adaptação definitiva das classificações SQI e RHRSm2 para taludes rochosos em vertentes naturais mas em contextos urbanos, peri-urbanos e rurais, não focando apenas as vias rodoviárias (que é o pressuposto da classificação original). Em boa medida, os trabalhos de NEC & LABCARGA (2015) e de Pacheco (2015) e a presente tese vão nesse sentido de esboçarem uma proposta para contextos rodoviários rurais a peri-urbanos;
- III. Modelação da queda de blocos que permitisse não só visualizar a aplicação das barreiras flexíveis enquanto método de proteção mas também a possibilidade de testar outros métodos existentes;
- IV. Modelação da queda de blocos que permitisse aliar a imagem tridimensional obtida pelo drone com cada um dos blocos identificados, permitindo dessa forma verificar através do vídeo o efeito e movimentação do bloco em 3D;
- V. Obrigatoriedade de controlo e monitorização do local a fim de verificar se as indicações de proteção da vertente, tanto as indicações genéricas como a própria proteção específica, estão em pleno funcionamento para melhor assegurar a intervenção realizada e as futuras intervenções a realizar.

Estes apontamentos serão importantes para a melhoria e aprofundamento deste tipo de trabalhos em muitas zonas do nosso país que se encontram menosprezadas e cujo risco é bastante elevado, podendo, à mínima alteração dos comportamentos naturais e habituais no local (relativamente a sismos, chuvas, incêndios, erosão dos solos, etc.) levar ao colapso de blocos e respetivas consequências nas populações e nos ecossistemas, bem como provocar sérios danos nas infraestruturas.

(Página propositadamente em branco)

6

Referências

(Página propositadamente em branco)

6. Referências Bibliográficas

- Austin, R., 2010. Unmanned Aircraft Systems: Uavs design, development and deployment. John Wiley & Sons Ltd, 280 p.
- Barton N., Lien R., Lunde J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6 (4): 189-239.
- Bateira, C., Soares, L., Rodrigues, D., Moura, R., Teixeira, M. & Santos, M., 2014. Movimentos de vertente no norte de Portugal: importância do comportamento hidrológico das formações superficiais. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15 (2):551-565.
- Bateira, C., Pereira, S., Martins, L. & Santos, M., 2008. Susceptibilidade a movimentos de vertente e cheias repentinas no apoio à protecção civil. *Revista de Geografia da Faculdade de Letras da Universidade do Porto*, p. 33-56.
- Bateira, C. & Soares, L., 1997. Movimentos em massa no norte de Portugal: factores da sua ocorrência. *Territorium*, 4:63-77.
- Bieniawski, Z.T., 1993. Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends. Hudson J.A., (ed.), *comprehensive rock engineering: principles, practice, and projects*. Pergamon Press, 33:553-574.
- Bieniawski, Z.T., 1989. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. Interscience, John Wiley & Sons, New York, 272 p.
- Bieniawski, Z. T., 1984. The design process in rock engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 17: 183-190.
- Bieniawski, Z.T., 1976. Rock mass classification in rock engineering. In: Bieniawski Z.T., ed., *Proceedings of the symposium Exploration for rock engineering*, Cape Town, Balkema, 1: 97-106.
- Bock H., 2006. Common ground in engineering geology, soil mechanics and rock mechanics: past, present and future. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 65:209-216.
- Brazão Farinha, J.S., Brazão Farinha, M. & Brazão Farinha, J.P., 2006. *RSA Anotado – Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (incluindo Eurocódigos)*, 2ª edição. Edições Gustave Eiffel. 383 p.
- Brum Ferreira, D., 1981. *Carte géomorphologique du Portugal*. Memórias Centro Estudos Geográficos, Lisboa, 6:1-54 (+ 2 mapas, escala 1/500000).
- Brum Ferreira, A., 1979. Os mantos de alteração e o modelado das regiões graníticas: ideias recentes e orientações de pesquisa. *Finisterra*, Lisboa, 14 (28):218-244.
- Brum Ferreira, A., 1978. Planaltos e montanhas do Norte da Beira: estudo de geomorfologia. Memórias Centro Estudos Geográficos, Lisboa, 4:1-374.
- Budetta, P., 2004. Assessment of rock fall risk along roads. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4: 71–81.
- Cabral, J. & Ribeiro, A., 1989. *Carta neotectónica de Portugal, escala 1/1000000*. Nota explicativa. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 10 p.
- Cabral, J. & Ribeiro, A., 1988. *Carta neotectónica de Portugal Continental, escala 1/1000000*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Celada B., Tardáguila I., Rodríguez A., Varona P. & Bieniawski Z.T., 2014. Innovating tunnel design by an improved experience-based RMR system. In: *Proceedings of the World Tunnel Congress 2014, Tunnels for a better Life*, Foz do Iguaçu, Brazil, p. 1-9.
- CFCFF – Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow, 1996. *Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications*. National Research Council, National Academy Press, 568 p.

-
- Chaminé, H.I., Afonso M.J., Ramos L. & Pinheiro R., 2015. Scanline sampling techniques for rock engineering surveys: insights from intrinsic geologic variability and uncertainty (Chapter 61). In: Giordan D., Thuro K., Carranza-Torres C., Wu F., Marinos P., Delgado C. (eds.), *Engineering Geology for Society and Territory – Applied Geology for Major Engineering Projects*, IAEG, Springer, 6:357-361.
- Chaminé, H.I., Afonso M.J., Teixeira J., Ramos L., Fonseca L., Pinheiro R. & Galiza A.C., 2013. Using engineering geosciences mapping and GIS-based tools for georesources management: lessons learned from rock quarrying. *European Geologist Magazine, Journal of the European Federation of Geologists*, 36:27-33.
- Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Silva, R.S., Moreira, P.F., Teixeira, J., Trigo, J.F., Monteiro, R., Fernandes, P. & Pizarro, S., 2010b. Geotechnical factors affecting rock slope stability in Gaia riverside (NW Portugal). In: Williams A.L., Pinches G.M., Chin C.Y., McMorran T.J. & Massey C.I., eds., *Proceedings of the 11th Congress of the International Association for Engineering Geology, IAEG'2010, Geologically Active, Auckland, New Zealand*. CRC Press: Taylor & Francis Group. p. 2729-2736.
- Chaminé H.I., Afonso M.J., Santos Silva R., Moreira P.F., Teixeira J., Trigo J.F., Monteiro R., Fernandes P. & Pizarro S., 2010a. Geotechnical factors affecting rock slope stability in Gaia riverside (NW Portugal). In: Williams A.L., Pinches G.M., Chin C.Y., McMorran T.J. & Massey C.I., eds., *Proceedings of the 11th Congress of the International Association for Engineering Geology, IAEG'2010, Geologically Active, Auckland, New Zealand*. CRC Press: Taylor & Francis Group. p. 2729-2736.
- Chaminé, H.I. & Gaspar, A.F., 1995. Estudo da compartimentação de maciços rochosos pela técnica de amostragem linear: aplicação a uma travessa da Mina de carvão de Germunde. *Estudos, Notas & Trabalhos, Inst. Geol. Min.*, 37:97-111.
- Conde, L.E.N., 1983. Mapa de fracturas de Portugal (Memória Descritiva). EDP. 118 p. + 4 mapas na escala 1/500000. (relatório inédito).
- Daveau, S., 1985. Mapas climáticos de Portugal: Nevoeiro e nebulosidade, Contrastes térmicos. *Mem. Centr. Estud. Geogr., Lisboa*, 7:1-72.
- Deere, D.U., Hendron A.J., Patton F.D., Cording E.J., 1967. Design of surface and near surface construction in rock. In: C. Fairhurst, (ed.), *Failure and breakage of rock, proceeding 8th U. S. symposium rock mechanics*. Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrol. Engrs., pp. 237-302.
- Deere, D.U. & Deere, D.W., 1988. The rock quality designation (RQD) index in practice. In: Kirkaldie L., ed., *Rock classification systems for engineering purposes*. ASTM Special Publication, Philadelphia, 984: 91-101.
- Deere D.U., 1963. Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock mechanics and engineering geology/ Felsmechanik und Ingenieurgeologie*, 1(1): 1-18.
- Dinis da Gama, C., 1995. Aspectos geotécnicos y de fracturación de las rocas ornamentales. In López Jimeno, C. (ed.), *Manual de Rocas Ornamentales*. Entorno Gráfico S.L., Madrid, p. 231-246.
- Dinis da Gama, C., 1991. Qualidade e patologia de obras geotécnicas. In: 4º Congresso Nacional de Geotecnia. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa, 3: 1-20.
- Fahlstrom, P.G. & Gleason T.J., 2012. *Introduction to UAV Systems*. 4th edition, John Wiley & Sons Ltd, 332 p.
- Ferreira, N., Iglésias, M., Noronha, F., Pereira, E., Ribeiro, A. & Ribeiro, M.L. 1987. Granitóides da Zona Centro-Ibérica e seu Enquadramento Geodinâmico. In: Bea et al. (eds.) *Geologia de los Granitóides e Rocas Asociadas del Macizo Hespérico*. Ed Rueda, Madrid, p. 27-53.
- Fonseca, L., Ramos, L., Galiza, A.C. & Chaminé, H.I., 2010. Avaliação geomecânica de maciços rochosos fracturados e as tecnologias de perfuração: consequências técnico-económicas. In: *Actas do 12º Congresso Nacional de geotecnia, SPG/UM, Guimarães*, 10 p.
- Gao Y., Zhang Y., Jiang L. & Huang Z., 2011. Researches on index system of rock slope safety evaluation for open pit mine. *Procedia Engineering*, 26:1692-1697.
- González de Vallejo L.I., Ferrer M., 2011. *Geological engineering*. CRC Press, Taylor-Francis group, 725 p.
- GSE [Geological Society Engineering Group Working Party Report], 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology, Geological Society*, 28(3):207-242.
- Hoek, E., Carter, T.G. & Diederichs, M.S., 2013. Quantification of the geological strength index chart. In: *Proceedings geomechanics symposium 47th US rock mechanics, San Francisco, CA, ARMA 13-672*, p. 1-8.
- Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B., 2002. Hoek-Brown failure criterion: 2002 edition. *Proceedings of the NARMS-TAC Conference, Toronto*, 1: 267-273.
- Hoek, E., Marinos, P. & Benissi, M., 1998. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: the case of the Athens Schist Formation. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 57(2):151-160.
-

-
- Hoek, E. & Bray, J.W., 1981. Rock slope engineering. Revised third edition. Inst. Mining and Metallurgy, London, 354 p.
- Hoek E., Brown E.T., 1980. Empirical strength criterion for rock masses. J. Geotech. Eng., ASCE 106 (GT9): 1013-1035.
- Hoek, E., 2007. Practical rock engineering. RocScience: Hoek's Corner, 342 p.
- Hoek E., 1994. Strength of rock and rock masses. News Journal of ISRM, 2(2): 4-16.
- IAEG – International Association Engineering Geology, 1981b. Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 24: 235-274.
- IAEG – International Association Engineering Geology, 1981a. Recommended symbols for engineering geological mapping. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 24: 227-234.
- IGeoE - Instituto Geográfico do Exército, 1997. Carta Militar de Portugal, à escala 1/25.000, Série M888: folha 133 (Amarante).
- IGP – Instituto Geográfico Português, 2010. Carta do uso e ocupação do solo de Portugal Continental para 2007 (COS2007). Memória descritiva, 87 p.
- INE – Instituto Nacional de Estatística, 2011. Informação estatística sobre a população portuguesa: Concelho de Penafiel. <http://www.ine.pt/> (consulta em Agosto de 2015)
- ISRM – International Society for Rock Mechanics, 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 15(6):319-368.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics, 1981. Basic geotechnical description of rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 18:85-110.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics, 2015. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. In: Ulusay R., ed., suggested methods prepared by the commission on testing methods, ISRM. Springer, Cham, Heidelberg. 293 pp.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics, 2007. The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: Ulusay R. & Hudson J.A., eds., suggested methods prepared by the commission on testing methods, ISRM. Ankara, Turkey. 628 pp.
- Jordan, R.B., 2015. A bird's-eye view of geology: the use of micro drones/UAVs in geologic fieldwork and education. GSA Today, 25(7):50-52.
- Liu, Y.C. & Chen, C.S., 2007. A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment. Engineering Geology, 89: 129–43.
- Marinos, V., Marinos, P. & Hoek, E., 2005. The geological strength index: applications and limitations. Bull. Eng. Geol. Environ., 64:55-65.
- Marinos P. & Hoek, E., 2000. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In: Proceedings GeoEng2000 on Geotechnical and Geological Engineering (Melbourne, Victoria, Australia). Technomic Publishers, Lancaster, p. 1422-1442.
- Mello Mendes, F., 1967-68. Mecânica das rochas. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 541 p.
- NEC & LABCARGA, 2015. Vertente rochosa de S. Simão: inspeção, avaliação de segurança e proposta de estabilização e de protecção. Relatório final para a Câmara Municipal de Amarante. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 75 p. + anexos (relatório confidencial).
- NP EN-1998-1 [Eurocódigo 8], 2010. Eurocódigo 8 – Projecto de estruturas para resistência aos sismos: Parte I – Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios. Instituto Português da Qualidade. 230 p.
- NP EN 1997-1 [Eurocódigo 7], 2010. Eurocódigo 7 – Projecto geotécnico, Parte 1: Regras gerais. Instituto Português da Qualidade. 179 p.
- Oliveira, J.T., Pereira, E., Ramalho, M., Antunes, M.T. & Monteiro, J.H. (coords.), 1992. Carta Geológica de Portugal, escala 1/500000. 5ª edição. 2 folhas. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- Pacheco C., 2015. Taludes rochosos: metodologias de inspeção e de avaliação de segurança: Caso de estudo das vertentes rochosas de S. Simão. Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 169 p. + anexos (tese de mestrado).
- Palmström A., Stille H., 2010. Rock engineering. Thomas Telford Ltd., 408 pp.
- Palmström, A. (1975). Characterization of degree of jointing and rock mass quality. Intern. Report Ing. AB. Berdel, A.S. Oslo.

-
- Peel, M.C., Finlayson, B.L. & McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*,11(5): 1633-1644.
- Pereira, S., Zêzere, J.L. & Bateira C., 2012. Assessing predictive capacity and conditional independence of landslide predisposing factors for shallow landslide susceptibility models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12:979-988.
- Pereira, E., Ribeiro, A. & Meireles, C., 1993. Cisalhamentos hercínicos e controlo das mineralizações de Sn-W, Au, e U na Zona Centro Ibérica, em Portugal. *Cadernos Laboratório Xeolóxico de Laxe, A Coruña*, 18: 89-119.
- Pereira, E., Ribeiro, A., Carvalho, G.S., Noronha, F., Ferreira, N. & Monteiro, J.H., 1989. Carta Geológica de Portugal, escala 1/200000. Folha 1, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Pierson, L.A., Davis, S.A., Van Vickle, R., 1990. Rockfall hazard rating system implementation manual. In: Report FHWA-OR-EG-90-01. Federal Highway Administration, US Department of Transportation. 80 p.
- Pina L., 2008. Quantitative risk assessment of rock fall hazard in the Amalfi coastal road, Barcelona, Spain. Polytechnic University of Cataluña. 90 p. (Thesis).
- Pinheiro, M., Sanches, S., Miranda, T., Neves, A., Tinoco, J., Ferreira, A. & Correia, A.G., 2015. A new empirical system for rock slope stability analysis in exploitation stage. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 76:182–191.
- Pinheiro, M., Sanches, S., Miranda, T., Neves, A., Tinoco, J., Ferreira, A. & Correia, A.G., 2014. Sistema de avaliação de qualidade de taludes rochosos em fase de exploração. In: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 14^o Congresso Nacional de Geotecnia [<http://hdl.handle.net/1822/31142>]
- Pinheiro, R., Ramos, L., Teixeira, J., Afonso, M.J. & Chaminé H.I., 2014. MGC–RocDesign|CALC: a geomechanical calculator tool for rock design. In: L.R. Alejano, A. Perucho, C. Olalla & R. Jiménez (Eds.), *Proceedings of Eurock2014, Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses (ISRM European Regional Symposium, Vigo, Spain, 26-28 May 2014)*, CRC Press/Balkema Taylor & Francis Group, London, p. 655-660. (on pen-drive insert, ISRM Paper CH100).
- Priest, S.D., 1993. *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman and Hall, London, 473 pp.
- Reid, T.R. & Harrison, J.P., 2000. A semiautomated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37: 1073-1089.
- Ribeiro, A., Munhá, J., Dias, R., Mateus, A., Pereira, E., Ribeiro, L., Fonseca, P.E., Araújo, A., Oliveira, J.T., Romão, J., Chaminé, H.I., Coke, C. & Pedro, J., 2007. Geodynamic evolution of the SW Europe Variscides. *Tectonics*, 26, TC6009, 24 p.
- Ribeiro, A., Conde, L. & Monteiro, J., 1972. Carta tectónica de Portugal, escala 1:1000000. Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos. Lisboa.
- Ribeiro, O., Lautensach, H. & Daveau, S., 1987a. *Geografia de Portugal. Vol I – A posição geográfica e o território*. Edições João Sá da Costa, Lisboa, p. 3-34
- Ribeiro, O., Lautensach, H. & Daveau, S., 1987b. *Geografia de Portugal. Vol II – O ritmo climático e a paisagem*. Edições João Sá da Costa, Lisboa, p. 336-623
- Rocha M., 2013. *Mecânica das Rochas*. Edição no âmbito das comemorações do centenário do nascimento do Engenheiro Manuel Rocha - 1913-2013. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 436 p.
- Romana, M., 1985. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In: *International Symposium on the role of rock mechanics*, ISRM, p. 49-53.
- Romana, M., 1993. A geomechanics classification for slopes: slope mass rating. In: Hudson J. (ed.), *Comprehensive Rock Engineering*, First Edition. Pergamon, Oxford. 45p.
- Romana, M., 1997. El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de la estabilidad de taludes. In: Alonso et al. (eds.), *IV Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables*, Granada, 3: 955-1011.
- Romana M., Serón J.B. & Montalar E., 2001. La clasificación geomecánica SMR: aplicación experiencias y validación. In: *Proceedings del V Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables*. Madrid, p. 393-404.
- Romana M., Serón J.B., Montalar E., 2003. SMR geomechanics classification: application, experience and validation. In: *Proceedings ISRM 2003*, p. 1-4.
-

-
- Santa, C., Gonçalves, L. & Chaminé, H.I., 2016. Aplicação da classificação geomecânica GSI (versão 2013) em frentes de escavação de maciços rochosos heterogêneos (túnel do Marão, norte de Portugal). In: Proceedings Congresso Nacional de Geotecnia, Porto, 11 p.
- Santos, M., Bateira, C., Soares, L. & Hermenegildo, C., 2014. Hydro-geomorphologic GIS database in Northern Portugal, between 1865 and 2010: temporal and spatial analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10:143-152.
- Simões Cortez J.A., 2004. 2004. Da pressão dos terrenos à geomecânica: evolução do conhecimento dos maciços rochosos. Lição Manuel Rocha. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa. (inédito).
- Teixeira, C., Fernandes, A. P., Peres, A. M. & Ribeiro, A., 1967. Carta Geológica de Portugal, escala 1/50000. Folha 10-C (Peso da Régua), Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Terzaghi, K. & Peck, R., 1987. *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Terzaghi, R.D., 1965. Sources of errors in joint surveys. *Geotéchnique*, 15(3): p. 287-304.
- Valayanis, K. & Vachtsevanos, G., 2015. *Handbook of unmanned aerial vehicles*. Springer, 3022 p.
- Vaz, T. & Zêzere J.L., 2016. Landslides and other geomorphologic and hydrologic effects induced by earthquakes in Portugal. *Natural Hazards*, 81: 71–98.
- Vaz, T. & Zêzere J.L., 2016. Landslides and other geomorphologic and hydrologic effects induced by earthquakes in Portugal. *Natural Hazards*, 81:71-98.
- Vieira, J.A. & Pinto, P.A., 2013. Amarante em “O Minho Pittoresco”. Reedição “Lisboa, Livraria de António Maria Pereira, 1887 – Tomo 2: Amarante – p. 403-442”. Círculo Lago Cerqueira, Amarante, 46 p.
- Watkins, H., Bond, C.E., Healy, D., Robert & Butler, R.W.H., 2015. Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterise heterogeneous fracture networks at outcrop. *Journal Structural Geology*, 72:67-82.
- Wyllie, D.C. & Mah, C.W., 2004. *Rock slope engineering: civil and mining*. 4th Edition. Spon Press, London and New York, 431 p.
- Wyllie, D.C., 2014. *Rock fall engineering*. CRC Press, 270 p.
- Zêzere, J.L., Vaz, T., Pereira, S., Oliveira, S.C., Marques, R. & Garcia, R., 2015. Rainfall thresholds for landslide activity in Portugal: a state of the art. *Environmental Earth Sciences*, 73(6):2917-2936.
- Zêzere, J.L., Pereira, S., Tavares, A.O., Bateira, C., Trigo, R.M., Quaresma, I., Santos, P.P., Santos, M. & Verde, J., 2014. DISASTER: a GIS database on hydro-geomorphologic disasters in Portugal. *Natural Hazards*, 72:503-532.

Sítios da internet consultados (Julho de 2015 a Junho de 2016)

<http://www.apambiente.pt/index.php?ref=19&subref=174>

<http://sniamb.apambiente.pt/Home/Default.htm>

<http://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/1981-2010/022/>

http://www2.apambiente.pt/IPAMB_DPP/docs/RNT1333.pdf

http://www2.apambiente.pt/IPAMB_DPP/docs/RNT1384.pdf

<http://www.cm-amarante.pt/>

<https://www.isrm.net/>

<http://www.iaeg.info/>

<http://www.spgeotecnia.pt/>

<https://www.rocscience.com/>

(Página propositadamente em branco)

7

Anexos **(ver Cd-Rom)**

Anexo I - Ficha de inspeção geral da Vertente Rochosa de S. Simão.

Anexo II - Ficha de inspeção geral da Vertente Rochosa de S. Simão, por sector.

Anexo III - Ficha de inspeção por bloco rochoso (potencialmente instável).