



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Geotecnia e geomecânica do maciço rochoso da exploração do Poço Negro (Penafiel): contributos para uma cartografia geotécnica do georrecurso

Daniel Rodrigues Pereira Lopes



2022

(página propositadamente em branco)



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Geotecnia e geomecânica do maciço rochoso da exploração do Poço Negro (Penafiel): contributos para uma cartografia geotécnica do georrecurso

Geotechnics and geomechanics of the Poço Negro quarry's rock mass (Penafiel): contributions to a geotechnical mapping of the georesource

Daniel Rodrigues Pereira Lopes

1151607

*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**, realizada sob a orientação do Doutor Helder I. Chaminé, Professor Coordenador com Agregação do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

Professor Coordenador, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador com Agregação, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutora Maria Isabel Gonçalves Fernandes

Professora Auxiliar com Agregação, Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Doutor Luís Carlos Correia Ramos

*Professor Adjunto Convidado, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto
Engenheiro Consultor Iberian Resources Portugal – Recursos Minerais, Unipessoal Lda*

A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente** (MEGG) foi apresentada e defendida em prova pública, por **Daniel Rodrigues Pereira Lopes**, em 14 de Novembro de 2022 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **19 (dezanove) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.

Em memória dos meus Avós...

(página propositadamente em branco)

Agradecimentos

Seis anos... Seis anos passaram desde a minha primeira aula na Licenciatura em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, uma aula teórico-prática de Geologia onde o objetivo seria identificar minerais através das suas propriedades. Seis anos memoráveis de evolução, com altos e baixos, que me trouxeram a este ponto conclusivo. Seis anos que só se tornaram possíveis com a contribuição, direta ou indireta, das pessoas, instituições e empresas a quem expresso os meus sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador científico, o Professor Helder I. Chaminé (DEG|ISEP e LABCARGA|ISEP), meu professor de geomecânica e geologia aplicada, a minha gratidão pela consideração, disponibilidade, partilha de bibliografia, trabalho de campo, discussões de vários tópicos e revisão minuciosa do manuscrito. Ainda, pela proposta de novos desafios no decorrer dos últimos meses e, sobretudo, por ser um mentor. Um especial obrigado por nunca ter desistido de mim nos primeiros anos de academia, quando me encontrava perdido, sem rumo, e por me ter motivado e mostrado o encanto da Geotecnia através de aulas de campo de Cartografia.

À minha amiga, Doutora Liliana Freitas (LABCARGA|ISEP), os meus agradecimentos pela constante boa disposição, companhia, vontade e rigor desde o primeiro dia no LABCARGA, e pela imprescindível ajuda no trabalho de campo e no tratamento de imagens, apoio na vectorização da cartografia e modelos 3D.

Um Obrigado especial ao meu supervisor em ambiente empresarial, Eng^o. Geotécnico Rui Santos Silva pela exigente partilha e aos colaboradores da empresa BRITAFIEL, S.A. pela oportunidade de realização de inúmeras visitas para desenvolver o trabalho de campo e garantirem as condições ideais para as mesmas, e pelo empenho, disponibilidade e partilha de documentação fundamentais para o desenvolvimento da dissertação. Grato à administração da BRITAFIEL, S.A. pela oportunidade em desenvolver o projeto de estágio profissional.

Ao Doutor Luís Ramos (DEG|ISEP), meu professor de engenharia de maciços rochosos, agradeço a dedicação e paciência demonstrada durante a atualização de um aplicativo geo-informático em Ms. Excel, destinada ao tratamento estatístico de dados geológico-geotécnicos e geomecânicos. O seu conhecimento e tenacidade motivaram-me a desenvolver, com a sua ajuda, uma versão atualizada (v.003) da aplicação *SCANGEO-DATA|BGD*.

Ao Professor José Augusto Fernandes (DEG|ISEP), meu professor de georrecursos, que me mostrou que “desistir” não é uma opção, e que a perseverança e dedicação são a chave para o sucesso. Muito obrigado.

Agradeço à Professora Maria José Afonso (DEG|ISEP e LABCARGA|ISEP), minha professora de hidrogeologia e geologia aplicada, pela companhia no laboratório e pela ajuda na gestão do *stress* ao longo dos últimos meses.

Ao Professor José Teixeira (FLUP), os meus agradecimentos por toda a ajuda e capacidade de resolução de problemas avançados relacionados com SIG e Ms. Excel.

Aos docentes do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG|ISEP), pelo encorajamento e motivação que demonstraram nestes seis anos.

Aos meus amigos e colegas de curso de mestrado (2^o e 1^o anos) Beatriz Cruz, Bruno Pacheco, Carina Vieira, Daniel Ferreira, Diana Santos, Gonçalo Costa, Hanna Moraes, Ivo Jacinto, José Carlos Almeida, Leandro Pinto, Luís Vieira e Pedro Teixeira, a minha gratidão pela disponibilidade na etapa de levantamentos de dados de campo com muitos dias de calor e muito suor. Juntaram-se, ainda, generosamente em intensas sessões de trabalho de campo as colegas Eng.^a Ana Mendes e Eng.^a Patrícia Moreira que muito agradeço. Bem-hajam a todos.

À minha amiga Karishma Sousa (aeISEP), um obrigado por toda a ajuda, disponibilidade e companhia nestes últimos anos do meu percurso académico.

Aos meus grandes amigos e colegas, Pedro Teixeira e Rui Ferreira, uma especial mensagem de gratidão pelo apoio e paciência no decorrer da licenciatura e do mestrado. Muitos trabalhos de grupo desenvolvi, e desenvolverei com vocês.

Aos meus colegas e amigos que fizeram parte do meu percurso académico, nestes seis anos, obrigado por todas as memórias.

À Cristina, um obrigado por todo o carinho, apoio, motivação, amizade e amor neste último ano. Lidaste com os meus momentos de desmotivação, ouviste as minhas ideias e decisões, e ajudaste-me a crescer.

À minha Avó Elvira Fontes, ao meu Avô Domingos Lopes e ao meu Avô José Rodrigues que, infelizmente, partiram nestes últimos seis anos, um obrigado por todo o amor que demonstraram desde o dia que nasci, e por terem moldado a minha infância.

Finalmente, aos meus Pais, à minha Irmã, à minha Avó, um profundo agradecimento pelo vosso sacrifício, esforço, apoio e amor incondicional, que me ajudou a evoluir e tornar-me quem eu sou hoje. Obrigado!

(página propositadamente em branco)

Palavras-chave

Maçços rochosos, zonamento geotécnico, geomecânica, agregados, rocha ornamental.

Resumo

A finalidade da presente dissertação é o estudo geológico-geotécnico e geomecânico dos maciços rochosos da Pedreira do Poço Negro (Duas Igrejas, Penafiel, NW de Portugal), propriedade da empresa BRITAFIEL, S.A.. Esta exploração a céu aberto produz agregados e rocha ornamental, o que indica uma potencial diferença significativa no comportamento geotécnico e geomecânico do maciço. Desta forma, procedeu-se à aplicação de uma cartografia de amostragem linear com o intuito de recolher dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos. A partir dos dados, após o seu armazenamento numa base dados, tratamento e análise estatística, resultou a definição de quatro zonas geotécnicas, constituídas por granito biotítico de duas micas, de grão médio a fino, geralmente ligeiramente alterado, cujas principais diferenças são destacadas pelo grau de fraturação, grau de alteração e resistência à compressão uniaxial. A partir dos resultados das linhas de amostragem linear, foi possível aplicar índices geológico-geotécnicos e geomecânicos (RQD, GSI e RMI) e classificações geomecânicas (RMR, Q-system, SRC). Considerando os dados e classificações dos índices e classificações aplicadas, foi possível definir uma cartografia com três zonas geomecânicas. Como complemento aos zonamentos geotécnicos e geomecânicos, foi estudada a compartimentação do maciço rochoso com maior detalhe, aplicando o chamado 'Índice de Fraturação do Granito' (GFI) para determinar se o mesmo exhibe competências para a potencial extração de rocha ornamental, a partir do espaçamento médio, do índice volumétrico e do número de famílias de descontinuidades. O cruzamento dos dados referentes aos zonamentos permitiu desenvolver uma cartografia geológica, cartografia geotécnica e cartografia geomecânica de síntese, com o respetivo modelo de terreno a três dimensões. Esta cartografia aplicada pretende contribuir para uma melhor gestão do georrecurso na sua dupla-valência, seja a extração de agregados seja como rocha-ornamental.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Rock masses, geotechnical zoning, geomechanics, aggregates, ornamental stone.

Abstract

The aim of the present dissertation is the geological-geotechnical, and geomechanical study of the rock mass of the Poço Negro quarry (Duas Igrejas, Penafiel, NW Portugal), owned by the company BRITAFIEL, S.A.. This open-pit quarry produces aggregates and ornamental rock, which indicates a potentially significant difference in the geotechnical and geomechanical behavior of the rock mass. Thus, a linear sample mapping was applied to collect geological, geotechnical and geomechanical data. From the data, after its storage in a database, treatment, and statistical analysis, four geotechnical zones were defined, composed of medium to fine-grained biotitic granite, generally slightly altered, whose main differences are highlighted by the fracture degree, alteration degree and uniaxial compression strength. From the results of the linear sampling lines, it was possible to apply geological-geotechnical and geomechanical indexes (RQD, GSI and RMI) and geomechanical classifications (RMR, Q-system, SRC). Considering the data, geotechnical indexes, and rock-mass classifications, it was possible to define an applied mapping with three geomechanical zones. As a complement to the geotechnical and geomechanical zonings, the rock-mass block size was studied in detail, including the application of the so-called 'Granite Fracture Index' (GFI) to determine whether it exhibits characteristics for potential ornamental stone extraction, from the fracture spacing, the volumetric index and the number of families of discontinuities. The crossing of the data regarding the zonings allowed the development of geological mapping, geotechnical mapping and geomechanical synthesis mapping of the site with the respective three-dimensional terrain model. The applied mapping aims to manage better the georesource in its dual value, either the extraction of aggregates or as an ornamental stone.

(página propositadamente em branco)

Índice

1.	Introdução geral	3
1.1.	Âmbito e enquadramento geral da investigação	3
1.2.	Objetivos	4
1.3.	Organização da dissertação	5
1.4.	Metodologias e técnicas: breve síntese	6
1.4.1.	Documentos cartográficos	7
1.4.2.	Técnica da Amostragem Linear	7
1.4.3.	Ensaio esclerométrico com martelo de <i>Schmidt</i> , tipo L.....	9
1.4.4.	Aplicativos informáticos: <i>GEOTECH CALC-TOOLS</i> e <i>MGC-RocDesign CALC</i>	10
1.4.5.	SIG e ferramentas geo-informáticas.....	13
1.4.5.1.	<i>GPS Trimble GeoExplorer GeoXH2005</i>	13
1.4.5.2.	<i>ESRI® ArcGIS</i>	13
1.4.5.3.	<i>OCAD® for cartography v.11</i>	14
2.	Caracterização geológico-geotécnica do maciço rochoso	17
2.1.	Generalidades	17
2.2.	Cartografia geológico-geotécnica das superfícies expostas do maciço rochoso	18
2.3.	Compartimentação dos maciços rochosos: parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos.....	19
2.4.	Sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos	23
2.4.1.	Considerações iniciais	23
2.4.2.	Índices blocométricos	27
2.4.4.	<i>Rock Quality Designation, RQD</i>	32
2.4.5.	<i>Rock Mass Rating, RMR₈₉</i>	34
2.4.6.	<i>Rock Tunneling Quality Index, Q-system</i>	39
2.4.7.	Correlação <i>Rock Mass Rating (RMR₈₉)</i> e <i>Q-system</i>	44
2.4.7.1.	Correlações empíricas.....	44
2.4.7.2.	Sustimento de túneis a partir de <i>RMR₈₉</i> e <i>Q-system</i>	45
2.4.7.3.	Estimativa do tempo de auto-sustimento	46
2.4.7.4.	Estimativa do módulo de deformabilidade do maciço rochoso (<i>E_M</i>) a partir de correlação entre <i>RMR</i> e <i>Q-system</i>	47
2.4.8.	<i>Geological Strength Index, GSI</i>	48
2.4.8.1.	Índice geológico-geomecânico, <i>GSI₁₉₉₈</i> e <i>GSI₂₀₀₀</i>	49
2.4.8.2.	Índice geológico-geomecânico, <i>GSI₂₀₁₃</i>	50
2.4.8.3.	Correlações com <i>RMR₈₉</i> e <i>Q-system</i>	51
2.4.8.4.	Determinação do módulo de deformabilidade do maciço rochoso (<i>E_M</i>).....	52
2.4.9.	<i>Surface Rock Classification, SRC</i>	52
2.4.10.	<i>Rock Mass Index, RMI</i>	56
3.	SIG e ferramentas geo-informáticas em geotecnia e geociências aplicadas	63
3.1.	Conceitos básicos da cartografia aplicada às geociências de engenharia e geotecnia.....	63
3.2.	Caracterização, classificação e conteúdo dos mapas geotécnicos	64
3.2.1.	Classificação geotécnica de solos e rochas	67
3.2.2.	Condições geomorfológicas	68
3.3.	Importância da cartografia de zonamento geotécnico e geomecânico em recursos geológicos	69
3.3.1.	Cartografia de zonamento geotécnico.....	70
3.3.2.	Cartografia de zonamento geomecânico	71
3.3.4.	Demonstração de dados.....	72
3.4.	Sistemas de informação geográfica (SIG).....	74
3.4.1.	Noções básicas e componentes do SIG	74

3.4.2.	Metodologias na implementação do SIG	77
3.4.3.	Sistemas de base de dados e modelos de dados em geotecnia	78
4.	Caso de estudo: Geotecnia e geomecânica da exploração do Poço Negro (Penafiel) para a criação de uma cartografia geotécnica do recurso pétreo	83
4.1.	Pedreira do Poço Negro: enquadramentos regional e local	83
4.1.1.	Enquadramento Geográfico	83
4.1.2.	Enquadramento geológico	84
4.1.3.	Enquadramento morfo tectónico e hidrológico	86
4.1.4.	Enquadramento hidroclimatológico	87
4.2.	Pedreira do Poço Negro: aspetos legais da exploração e constrangimentos ambientais	88
4.3.	Cartografia e modelação 3D da Pedreira do Poço Negro	91
4.4.	Investigações sobre a compartimentação do maciço rochoso do Poço Negro	93
4.4.1.	Parâmetros geológico-geotécnicos: apresentação e discussão	95
4.4.2.	Caracterização das principais famílias de discontinuidades	99
4.4.3.	Definição das zonas geotécnicas	103
4.4.3.1.	ZG1.A	107
4.4.3.2.	ZG1.B	110
4.4.3.3.	ZG2.A	113
4.4.3.4.	ZG2.B	116
4.4.4.	Cartografia do zonamento geotécnico da exploração: uma proposta	119
4.5.	Blocometria e qualidade do maciço rochoso do Poço Negro	121
4.5.1.	Proposta de zonamento blocométrico	123
4.6.	Estudo geomecânico do maciço rochoso do Poço Negro	125
4.6.1.	Avaliação das condições e parâmetros geomecânicos: apresentação e discussão	125
4.6.2.	Definição e cartografia do zonamento geomecânico da exploração: uma proposta	129
4.7.	Avaliação do grau de compartimentação do maciço rochoso: implicações na gestão racional do georrecurso	131
4.7.1.	Estimativa do índice de fraturação do granito (<i>GFI</i>)	135
4.7.2.	Considerações finais	136
5.	Conclusões	139
5.1.	Considerações finais	139
5.2.	Perspetivas futuras	141
	Referências bibliográficas	145

Índice de figuras

Figura 1 - Tarefas realizadas em campo, em gabinete e em laboratório.	4
Figura 2 - Fluxograma representativo dos objetivos principais da dissertação.	5
Figura 3 - Sequência dos capítulos abordados na dissertação.	6
Figura 4 - Exemplo da aplicação geo-informática <i>SCANGEO-DATA/BGD v.3.0</i> : uma ferramenta para o tratamento e análise estatística dos parâmetros geológico-geotécnicos (adaptado de: Fonseca et al., 2010; Chaminé et al., 2016; Ramos, 2022).....	11
Figura 5 - Exemplo ilustrativo da base de dados geomecânica <i>SCHMIDT-DATA/UCS v.3.0</i> (adaptado de Fonseca et al., 2010; Chaminé et al., 2016; Ramos, 2022).	12
Figura 6 - Demonstração da ferramenta geo-informática <i>MGC-RocDesign/CALC v1.0</i> (Pinheiro, 2013; Pinheiro et al., 2014b; Chaminé et al., 2016).	13
Figura 7 - Vantagens e funcionalidades do software <i>OCAD® for cartography v.11</i> (adaptado de https://www.ocad.com).	14
Figura 8 - O ciclo das rochas numa perspectiva da geoengenharia e das geociências de engenharia: uma visão que retrata as questões da mecânica das rochas e da mecânica dos solos (adaptado de Dobereiner & de Freitas, 1986). Segundo: Chaminé et al. (2013).	17
Figura 9 - Aplicação da técnica da amostragem linear (TAL) e parâmetros geológicos-geotécnicos (ISRM, 1978, 1981) (Segundo: Hudson & Harrison, 2000; González de Vallejo & Ferrer, 2011).	18
Figura 10 - Parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos das discontinuidades e da matriz rochosa (adaptado de ISRM, 1978, 1981; González de Vallejo & Ferrer, 2011).	19
Figura 11 – Uma visão geral das classificações geomecânicas destinadas a minas, escavações de túneis e estabilidade de taludes e bases de dados, descrições, índices de maciços rochosos, índices geotécnicos e hidrogeomecânicos (adaptado e atualizado de Pinheiro et al., 2014b).	25
Figura 12 - Parâmetros que influenciam o tamanho do bloco unitário (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).....	27
Figura 13 - Formas do bloco resultantes do padrão de fraturação do maciço rochoso com três famílias de discontinuidades (adaptado de Dearman, 1991). Segundo: Palmström (1995).	29
Figura 14 - Volume do bloco delimitado pelas famílias de discontinuidades (adaptado de Kim et al., 2007).	30
Figura 15 - Diferentes parâmetros contabilizados para a obtenção do <i>Rock Mass Rating</i> (adaptado de Bieniawski, 1973, 1989).....	34
Figura 16 - Parâmetros contabilizados para a determinação do índice <i>Q-system</i> (Barton et al., 1974, 1980; NGI, 2015).	39
Figura 17 - Soluções de sustimento de acordo com o <i>Q-system</i> em correlação com a <i>Rock Mass Rating</i> (<i>RMR</i> 89), com base nas propostas de Grimstad & Barton, 1993 e Barton, 2000 (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).	46
Figura 18 - Estimativa do tempo de auto-sustimento do maciço rochoso com base no vão livre e no índice <i>RMR</i> 89, com casos históricos de Bieniawski (1989). Conversão de <i>RMR</i> 89 para <i>Q-value</i> a partir de Barton (1995) (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).	47
Figura 19 - Determinação do módulo de deformabilidade do maciço rochoso a partir de <i>RMR</i> 89 e <i>Q-system</i> , com casos históricos de Bieniawski (1978) e Serafim & Pereira (1983). Conversão de <i>RMR</i> para <i>Q-value</i> a partir de Barton (1995) (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).	48
Figura 20 - Parâmetros para a determinação da versão 2000 (<i>GSI</i> 2000) ligeiramente melhorada da versão 1998 (adaptado de Hoek et al. 1998; Hoek & Marinos, 2000).	49

Figura 21 - Ábaco para a estimativa de $GSI/_{2000}$ para rochas cristalinas fraturadas (adaptado de Marinós & Hoek, 2000; Cai et al., 2004; Santa et al., 2019).	50
Figura 22 - Quantificação do $GSI/_{2013}$ através do fator de condição das descontinuidades e RQD (adaptado de Hoek et al., 2013; Santa et al., 2019).	51
Figura 23 - Parâmetros para a determinação do índice SRC (adaptado de González de Vallejo, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011).	53
Figura 24 - Indicadores para a determinação do estado de tensão do maciço rochoso para a SRC (González de Vallejo, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011).	53
Figura 25 - Parâmetros para a determinação do $RMI/_{2000}$ (adaptado de Palmström, 1995, 1996a,b, 2000).	56
Figura 26 - Funcionalidades da aplicação $RMI/CALC$. A) Tabela de inserção de dados; B) Parâmetros corretivos para o cálculo de índice $RMI/_{2000}$; C) Estimativa do 'ground condition factor' e do 'size ratio'	59
Figura 27 - Ábaco para a determinação da proposta de sustimento do túnel através dos fatores G_c e S_r e comprimento recomendado das pregagens no teto e hasteais (Palmström, 1995, 2000, 2009).	60
Figura 28 - Aspetos gerais relacionados com a engenharia geotécnica para a conceção de mapas geotécnicos e fatores que influenciam o conteúdo, detalhe e complexidade dos mesmos (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).	64
Figura 29 - Classificação dos mapas geotécnicos de acordo com o seu propósito, temática e escala (adaptado de: UNESCO-IAEG, 1976; Dearman, 1991; Hrasna & Vicko, 1994; Griffiths, 2002; Proske et al., 2005; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Chaminé et al., 2016;	65
Figura 30 - Informação básica que deve constar em qualquer mapa geotécnico (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).	66
Figura 31 - Descrição e classificação geológico-geotécnica de maciços rochosos e terrosos com vista à cartografia geotécnica (adaptado de IAEG, 1981a,b; Griffiths, 2002).	68
Figura 32 - Informações relativas às condições geomorfológicas de interesse em aplicações geotécnicas (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).	69
Figura 33 - Parâmetros geológico-geotécnicos que definem as zonas e/ou subzonas geotécnicas (ISRM, 1978, 1981).	70
Figura 34 - Classificações geomecânicas desenvolvidas para a diferenciação de zonas geomecânicas.	71
Figura 35 Métodos de recolha de dados para o mapeamento geotécnico (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).	72
Figura 36 - As três perspetivas fundamentais do SIG (adaptado de ESRI.com, 2009a).	74
Figura 37 - Elementos de representação da informação geográfica (adaptado de ESRI.com, 2009a,b).	76
Figura 38 - Fluxo de trabalho em ambiente SIG (adaptado de Bateira, 2001). Fotografias retiradas de "Esri Introduces ArcGIS Platform" (Cardella, 2021).	77
Figura 39 - Processo convencional para a conceção de uma base de dados (adaptado de Chen, 1977; Pinho, 2010).	79
Figura 40 - A) Exemplo da técnica da amostragem linear (Scanline – SC01); B) Perspetiva da transição da exploração de rocha ornamental e agregados (NE); C) Vista da exploração de rocha ornamental (NW); D) Panorama da exploração de agregados (SC04, SC05, SC06 e SC07); E) Vista aérea do sul da Pedreira do Poço Negro (maio de 2022).	83
Figura 41 - Enquadramento geográfico da pedreira de Poço Negro, Duas Igrejas, Penafiel (NW de Portugal).	84
Figura 42 - Enquadramento geológico regional do centro de exploração do Poço Negro (adaptado de Medeiros et al., 1981b).	85

Figura 43 - Composição da matriz rochosa: quartzo, plagioclase, biotite e moscovite. Na esquerda da amostra observa-se xenólito.	86
Figura 44 - Informações relativas à temperatura máxima, média e mínima (oC), precipitação média (mm), humidade (%), dias de chuva (dados analisados entre 1991 e 2021) e média de horas de luz solar (dados analisados entre 1999 e 2019) (adaptado de https://en.climate-data.org/ , consultado a 13 de junho, 2022).	88
Figura 45 - Ortofotomapa com a área licenciada e a licenciar da pedreira do Poço Negro (áreas transpostas do documento “Plano de Pedreira BRITAFIEL”).	89
Figura 46 - Localização da área da pedreira já licenciada e a licenciar na planta de ordenamento de território (adaptado de C.M. Penafiel).	90
Figura 47 - Localização da área da pedreira já licenciada e a licenciar na planta de condicionantes de território (adaptado de C.M. Penafiel).	90
Figura 48 - Localização da área da pedreira já licenciada e a licenciar na Carta de Uso e Ocupação do Solo (adaptado de Direção-Geral do Território, 2018).	91
Figura 49 – Ortofoto de pormenor para o desenvolvimento dos mapas de zonamentos geotécnico e geomecânico (março 2022). Foto aérea gentilmente cedida por BRITAFIEL, S.A.	92
Figura 50 - Modelação em 3D da Pedreira do Poço Negro com: A) vista à exploração de rocha ornamental, a norte; B) perspetiva do sul da pedreira, das zonas de exploração de agregados (março de 2022).	92
Figura 51 - Localização das diferentes Scanlines aplicadas para o levantamento dos parâmetros geológico-geotécnicos (março de 2022).	93
Figura 52 - Organização das scanlines quanto ao patamar onde foram realizadas e a distância à origem determinada.	94
Figura 53 - Diagramas geológico-estruturais: diagrama de rosetas e estereograma representativos da globalidade das descontinuidades, recorrido ao software geo-informático <i>Rocscience Dips (v.6.008)</i>	100
Figura 54 - Gráficos resumo da contagem geral de descontinuidades distribuídas por intervalos de direção, inclinação e quadrante, número de descontinuidades por família, geral e aleatórias e principais amplitudes de inclinação de acordo com o seu quadrante.	102
Figura 55 - Proposta da cartografia de zonamento geotécnico (setembro de 2022) da Pedreira do Poço Negro.	120
Figura 56 - Diferentes perspetivas da cartografia 3D do zonamento geotécnico da Pedreira do Poço Negro.	121
Figura 57 - Proposta de intervalos de fraturação (zonamento blocométrico) sobreposto ao zonamento geotécnico.	124
Figura 58 - Representação dos índices e classificações geomecânicas em gráficos de radares. A) Representação gráfica das classificações geomecânicas $RMR/_{89}$, $SRC/_{2003}$ e índice geotécnico-geomecânico $GSI/_{2013}$; B) Representação gráfica da classificação geomecânica $Q-system/_{80}$ e índice geotécnico-geomecânico $RMI/_{2000}$ em escala logarítmica.	127
Figura 59 - Gráficos representativos das correlações entre os vários índices geotécnicos e classificações geomecânicas.	128
Figura 60 - Proposta de cartografia de zonamento geomecânico.	130
Figura 61 - Diferentes perspetivas da cartografia 3D do zonamento geomecânico da Pedreira do Poço Negro.	131
Figura 62 - Representação gráfica das dimensões mínimas, médias e máximas dos blocos expectáveis em cada zona geotécnica, com a respetiva volumetragem (representação esquemática do maciço rochoso adaptada de Palmström 1995).	133

(página propositadamente em branco)

Índice de quadros

Quadro 1 - Características da técnica da amostragem linear aquando da sua aplicação em maciços rochosos fraturados (adaptado de ISRM, 1981; Priest & Hudson, 1981; Hudson & Priest, 1983; Priest, 1993; Mauldon et al., 2001; Rohrbaugh et al., 2002; Priest, 2004; Brady & Brown, 2007; Peacock, 2006; Fonseca et al., 2010; Chaminé et al., 2010, 2013, 2014; Galiza et al., 2011; Chaminé, 2016).	8
Quadro 2 - Ensaio de avaliação da resistência mecânica do maciço rochoso recorrendo ao esclerómetro portátil, ou martelo de <i>Schmidt</i> - tipo L (adaptado de Schmidt, 1951; Miller, 1965; Farmer, 1968; ISRM, 1981; Rahn, 1986; Goodman, 1989; Cargill & Shakoor, 1990; Waltham, 2002; González de Vallejo & Ferrer, 2011).9	9
Quadro 3 - Parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos da matriz rochosa e das descontinuidades (adaptado de ISRM, 1978, 1981; GSE, 1995; González de Vallejo et al., 2002; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Chaminé et al., 2013, 2015; Chaminé, 2016).	21
Quadro 4 – Índices geotécnicos e classificações geomecânicas aplicadas com os respetivos parâmetros do maciço rochoso e das descontinuidades a analisar e conclusões do estudo (Deere, 1963; Deere et al., 1967; Bieniawski, 1973, 1976, 1979, 1989; Barton et al., 1980; González de Vallejo, 1983, 2003; Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Hoek & Brown, 1997; Hoek et al., 1998; Marinos & Hoek, 2000; Marinos et al., 2005; Barton, 2006; Palmström & Stille, 2010, 2014; González de Vallejo & Ferrer, 2011; NGI, 2015; Celada & Bieniawski, 2020).	24
Quadro 5 - Equações base para a obtenção dos índices blocométricos - índice volumétrico, <i>Block Size Index</i> e frequência de descontinuidades (ISRM, 1978; Palmström, 1995; González de Vallejo & Ferrer, 2011).	28
Quadro 6 - Descrição do bloco em termos de tamanho a partir da sua dimensão máxima, ou índice dimensional, <i>I_b</i> (BSI, 2003).	28
Quadro 7 - Determinação do tamanho do bloco através do índice volumétrico, <i>J_v</i> (ISRM, 1978, 1981; Toyos et al., 1994; González de Vallejo & Ferrer, 2011).	28
Quadro 8 - Classificação do maciço rochoso quanto ao tamanho dos blocos e na sua forma (ISRM, 1978). ..	29
Quadro 9 - Indicação do tamanho do bloco para fins de rocha ornamental de acordo com a densidade de descontinuidades (Orce García, 1996).	31
Quadro 10 - Métodos de aquisição do índice <i>RQD</i> e <i>TRQD_t</i> (e.g., Deere, 1963; Deere et al., 1967; Priest & Hudson, 1976; Priest, 1993; Palmström, 1995, 2005; Pells et al., 2017).	33
Quadro 11 - Classificação do maciço rochoso a nível de qualidade correlacionando com índice <i>RQD</i> (adaptado de Deere et al., 1967).	34
Quadro 12 - Parâmetros para a avaliação do <i>Rock Mass Rating (RMR/89)</i> e consequente ajuste derivado da orientação das descontinuidades, avaliação da qualidade, coesão e ângulo de atrito do maciço rochoso, tempo médio de autossustentação e proposta de sustimento (adaptado de Bieniawski, 1973, 1989, 1993; Waltham, 2002; Celada et al., 2014; Celada & Bieniawski, 2020).	37
Quadro 13 - Índice de qualidade de rocha (<i>RQD</i>), número de famílias de descontinuidades (<i>J_n</i>) e índice de rugosidade das descontinuidades (<i>J_r</i>) (adaptado de Barton et al., 1974, 1980).	40
Quadro 14 - Índice de alteração das descontinuidades (<i>J_a</i>) com o respetivo ângulo de atrito interno (Φ_r) e fator de redução do caudal (<i>J_w</i>) (adaptado de Barton et al., 1974, 1980).	41
Quadro 15 - Determinação do estado de tensão do maciço, <i>SRF</i> (adaptado de Barton et al., 1974, 1980). ..	42
Quadro 16 - Diferentes finalidades da escavação com a respetiva classe e fator de segurança, <i>ESR</i> (adaptado de Barton et al., 1980; Hoek, 2007; NGI, 2015).	43
Quadro 17 - Cálculo do comprimento das pregagens e ancoragens em meio subterrâneo (adaptado de Barton et al., 1974, 1980).	43
Quadro 18 - Sumário das diferentes correlações entre <i>RMR</i> e <i>Q-system</i> (Rutledge & Preston, 1978; Moreno Tallon, 1980; Cameron-Clarke & Budavari, 1981; Abad et al., 1984; Bieniawski, 1984; Barton, 1995; Singh & Goel, 1999).	45

Quadro 19 - Expressões para o cálculo do módulo de deformabilidade do maciço rochoso a partir das classificações <i>RMR</i> ou <i>Q-system</i> (Bieniawski, 1978, 1989; Serafim & Pereira, 1983; Grimstad & Barton, 1993; Barton & Bieniawski, 2008).	47
Quadro 20 - Aproximações empíricas ao <i>GSI</i> (Barton et al., 1974; Bieniawski, 1989; Hoek & Brown, 1997).	52
Quadro 21 - Qualidade do maciço rochoso consequente de <i>GSI</i> (adaptado de Hoek, 2007).	52
Quadro 22 - As três conclusões de estabilidade determinadas pelo fator de competência (González de Vallejo, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011).	54
Quadro 23 - Correções ao fator <i>SRC</i> aplicados quando a classificação é desenvolvida em taludes (adaptado de González de Vallejo, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011).	54
Quadro 24 - Fatores quantificados para a aplicação da classificação geomecânica <i>SRC</i> (adaptado de González de Vallejo, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011).	55
Quadro 25 - Fatores de rugosidade, de alteração e de persistência das descontinuidades para o cálculo do seu fator de condições geológico-geotécnicas (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2010, 2014).	57
Quadro 26 - Qualidade do maciço rochoso e a sua relação com a sua resistência através do $RMI/2000$ (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2014).	58
Quadro 27 - Classificação dos mapas geotécnicos conforme a sua escala (adaptado de Dearman, 1991; Griffiths, 2002; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Chaminé et al., 2016; Chaminé & Fernandes, 2023).	66
Quadro 28 - Relação entre as propriedades geológicas e geotécnicas e os parâmetros geológico-geotécnicos a incluir numa cartografia geotécnica (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).	68
Quadro 29 - Classificação das unidades com vista ao mapeamento geotécnico (adaptado de UNESCO-IAEG, 1976; IAEG, 1981a,b; González de Vallejo & Ferrer, 2011).	70
Quadro 30 - Representação cartográfica de elementos básicos em mapas geotécnicos (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).	73
Quadro 31 - Características das diferentes “scanlines” (SC) realizadas.	94
Quadro 32 - Quadro síntese de análise estatística dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos registados na generalidade das scanlines, segundo as propostas da <i>ISRM</i> (1978, 1981).	98
Quadro 33 - Intervalo predominantes de direção e inclinação, diagrama de rosetas e estereograma representativo das diferentes famílias de descontinuidades.	100
Quadro 34 - Denominação e descrição das zonas geotécnicas definidas com a respetiva contagem de descontinuidades incluídas em cada uma.	103
Quadro 35 - Estudo estatístico a nível dos parâmetros geológico-geotécnicos de espaçamento, resistência, abertura e continuidade para cada zona geotécnica (<i>ISRM</i> , 1978, 1981).	105
Quadro 36 - Estimativa do espaçamento médio para cada família de descontinuidades.	107
Quadro 37 - Quadro síntese da análise estatística dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos registados na ZG1.A, segundo as propostas da <i>ISRM</i> (1978, 1981).	109
Quadro 38 - Quadro síntese de análise estatística dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos registados na ZG1.B, segundo as propostas da <i>ISRM</i> (1978, 1981).	112
Quadro 39 - Quadro síntese de análise estatística dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos registados na ZG2.A, segundo as propostas da <i>ISRM</i> (1978, 1981).	115
Quadro 40 - Quadro síntese de análise estatística dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos registados na ZG2.B, segundo as propostas da <i>ISRM</i> (1978, 1981).	118
Quadro 41 - Síntese dos índices blocométricos e aproximação do índice de qualidade da rocha (terminologia dos parâmetros adaptada de Priest & Hudson, 1976; <i>ISRM</i> , 1978, 1981; Priest, 1993; Palmström, 1995, 2005; BSI, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011).	122
Quadro 42 - Proposta de zonamento blocométrico.	123

Quadro 43 - Compilação dos resultados obtidos dos índices geotécnicos e classificações geomecânicas referentes às diferentes zonas.	126
Quadro 44 - Quadro síntese dos índices geotécnicos e classificações geomecânicas para cada zona geotécnica.	127
Quadro 45 - Descrição e avaliação da sugestão de zonamento geomecânico.	129
Quadro 46 - Volumes de bloco mínimos, médio, máximos e teóricos para cada zona geotécnica e respetivo cálculo do peso expectável.....	132
Quadro 47 - Correlação entre a sugestão de peso dos blocos ornamentais comerciáveis, pela BRITAFIEL, S.A. e o peso do bloco expectável por zona geotécnica de acordo com a geometria calculada.	134
Quadro 48 - Estimativa do <i>Granite Fracturing Index (GFI)</i> para as diferentes zonas geotécnicas.	135

(página propositadamente em branco)

Índice de equações

Equação 1 - Expressão volumétrica da densidade de descontinuidades (adaptado de Palmström, 1995).	29
Equação 2 - Expressão para o cálculo do índice <i>GFI</i> (Sousa, 2007).....	30
Equação 3 - Fórmula para obtenção do espaçamento médio (Sousa, 2007).	30
Equação 4 - Expressão de cálculo do valor médio da persistência (Sousa, 2007).	31
Equação 5 - Expressão para o cálculo do índice J_p (Sousa, 2007).....	31
Equação 6 - Determinação de <i>TRQD</i> para $t = 0,1$ (Priest, 1993).....	32
Equação 7 - Correção do índice $RMR/_{89}$ (Celada et al., 2014; Celada & Bieniawski, 2020).	35
Equação 8 - Cálculo do índice <i>Q-system</i> a partir dos parâmetros referentes à estrutura da massa rochosa e dimensões do bloco unitário, características das descontinuidades e fator empírico do estado de tensão do maciço rochoso (Barton et al., 1974, 1980; Barton, 2006; NGI, 2015).....	39
Equação 9 - Expressão de cálculo da dimensão equivalente (Barton et al., 1974; NGI, 2015).	43
Equação 10 - Expressão de cálculo do vão livre máximo de um maciço autoportante (Barton et al., 1974).	43
Equação 11 - Expressão para a determinação da capacidade de carga da estrutura de sustento, <i>P</i> (Barton et al., 1974).	44
Equação 12 - Formato base das correlações entre $RMR/_{89}$ e <i>Q-system</i> (Rutledge & Preston, 1978).....	44
Equação 13 - Correlação entre $RMR/_{89}$ e <i>Q-system</i> proposto por Barton (1995).	45
Equação 14 - Relação empírica entre as principais tensões efetivas à rotura (Hoek & Brown, 1980a).	48
Equação 15 – Fórmula para aquisição do $GSI/_{2013}$ (Hoek et al., 2013).	50
Equação 16 - Estimativa indireta do módulo de deformabilidade a partir da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta e de <i>GSI</i> (Hoek & Brown, 1997).	52
Equação 17 - Expressão para o cálculo do fator de competência (González de Vallejo, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011).....	53
Equação 18 - Expressão de cálculo do fator de condição das descontinuidades (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2010, 2014).	56
Equação 19 - Determinação do fator de compartimentação (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2010, 2014).....	56
Equação 20 - Fórmula de cálculo do <i>Rock Mass Index</i> , $RMi/_{2000}$ (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2010, 2014).....	57

(página propositadamente em branco)

Índice de acrónimos e abreviaturas

A	<i>Aperture</i> (Abertura)
a	Espaçamento entre pregagens
B	Largura da escavação
BGD	<i>Basic Geotechnical Description of Rock Masses</i>
BSI	<i>The British Standards Institution</i>
c	<i>Curvature</i> (Curvatura)
C	Fator de ajuste de gravidade
Cg	<i>Ground Condition factor – Continuous ground</i>
CGIS	<i>Canadian Geographic Information System</i>
CIGeoE	Centro de Informação Geoespacial do Exército
Co	Fator de ajuste à principal família de descontinuidades
Co_s	Fator de ajuste à camada
C_{sb}	<i>C – warm temperature; S: steppe; b: warm summer</i>
D	Distância à origem da fita graduada
Db	Diâmetro equivalente do bloco
De	Dimensão equivalente
DoD	<i>U.S. Department of Defense</i>
Dt	Diâmetro do túnel
E_M	Módulo de deformabilidade
e_n	Espaçamento médio entre descontinuidades
ESR	<i>Excavation Support Ratio</i>
F	<i>Fracture intercept</i> (Espaçamento, grau de fraturação)
F_A	Corredor de fraturação A
F_B	Corredor de fraturação B
F_C	Corredor de fraturação C
F_c	Fator de competência
f_G	<i>Massivity parameter</i> (Parâmetro de massividade)
G.S.L	<i>Geological Society of London</i>
Gc	<i>Ground Condition factor</i>
GFI	<i>Granite Fracturing Index</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSE	<i>Geological Society Engineering</i>
GSI	<i>Geological Strength Index</i>
Gw	<i>Groundwater</i> (Percolação da água)
H	Altura da escavação
HC-system	<i>Rock Mass Hydraulic Conductivity System</i>
HP-value	<i>Hydro-Potential Value</i>
IAEG	<i>International Association for Engineering Geology and the Environment</i>
I_b	<i>Block Size Index</i>
ICA	<i>International Cartographic Association</i>
I_{dz}	Alterabilidade pelo efeito da água
ISRM	<i>International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering</i>
jA	Fator de alteração
jC	Fator de condição das descontinuidades de acordo com <i>RMi</i> ₂₀₀₀
J_{C189}	<i>Joint Condition Factor</i> de acordo com <i>RMR</i> ₈₉
J_l	<i>Average Joint Length</i> (Persistência média das descontinuidades)
jL	Fator de persistência
jP	Fator de compartimentação
J_p	<i>Joint persistence</i> (índice de terminação)
jR	Fator de rugosidade
J_s	<i>Average Joint Spacing</i> (Espaçamento médio entre descontinuidades)
J_v	Índice volumétrico
L	<i>Length</i> (Semi-comprimento exposto, continuidade ou persistência)
L'	Vão livre máximo
L_A	Comprimento das ancoragens
L_B	Comprimento das pregagens
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
I_n	Comprimento médio das descontinuidades
L_n	Valor médio da persistência por zona geotécnica
m_i	Constante da rocha intacta

MRMR	<i>Mining Rock Mass Rating</i>
N	Número de descontinuidades
NATM	<i>New Austrian Tunneling Method</i>
NGI	<i>Norwegian Geotechnical Institute</i>
N_j	Fator de ajuste ao número de famílias de descontinuidades
N_R	Número de descontinuidades aleatórias
N_r	Número de descontinuidades que terminam em rocha
P	Capacidade de carga de uma pregagem
PLT	<i>Point Load Test</i> (Ensaio de carga pontual)
r	<i>Rebound</i>
R	<i>Rugosity</i> (Rugosidade)
R²	Coeficiente de determinação
REN	Reserva Ecológica Nacional
RLM	<i>Rock Load Mass Classification System</i>
RME	<i>Rock Mass Excavability</i>
RMI	<i>Rock Mass Index</i>
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>
RMR ₁₄	<i>Rock Mass Rating</i> , proposta por Celada et al. (2014)
RMR ₈₉	<i>Rock Mass Rating</i> , proposta por Bieniawski (1989)
RQD	<i>Rock Quality Designation</i>
RSR	<i>Rock Structure Rating</i>
S	Classe de resistência
s	Constante do material
SGBD	Sistema de Gestão de Base de Dados
SIG	Sistema(s) de Informação Geográfica
SL	<i>Stress level adjustment</i> (Fator de ajuste da tensão)
SMR	<i>Slope Mass Rating</i>
SQR	<i>Slope Quality Rating</i>
S_R	Espaçamento médio das descontinuidades aleatórias
S_r	<i>Size ratio</i>
SRC	<i>Surface Rock Classification</i>
SRF	<i>Stress Reduction Factor</i>
ST	<i>Stand-up Time</i>
T	<i>Termination</i> (tipo de terminação)
t	<i>Threshold</i>
TAL	Técnica da amostragem linear
TBM	<i>Tunnel Boring Machine</i>
TIA	<i>Tunnel Information and Analysis System</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i> (Rede triangulada irregular)
TRQD	<i>Theoretical Rock Quality Designation</i>
T_z	Espessura da zona de fraqueza
UCS	<i>Uniaxial Compressive Strength</i> (Resistência à compressão uniaxial)
USCS	<i>Unified Soil Classification System</i>
VB	<i>Visual Basic</i>
V_b	Volume do bloco
VRS	<i>Volcanic Rock System</i>
W_t	Altura dos hasteais do túnel
ZB	Zonamento blocométricos
ZB1	Zona blocométrica 1
ZB2	Zona blocométrica 2
ZB3	Zona blocométrica 3
ZG	Zona Geotécnica
ZG0	Zona Geotécnica 0
ZG1.A	Zona Geotécnica 1, subzona geotécnica A
ZG1.B	Zona Geotécnica 1, subzona geotécnica B
ZG2.A	Zona Geotécnica 2, subzona geotécnica A
ZG2.B	Zona Geotécnica 2, subzona geotécnica B
ZGM	Zona Geomecânica
ZGM1	Zona geomecânica 1
ZGM2	Zona geomecânica 2
ZGM3	Zona geomecânica 3
γ_n	Ângulo entre famílias de descontinuidades
σ₁	Tensão principal

σ'_1	Tensão efetiva principal máxima à rotura
σ'_3	Tensão efetiva principal mínima à rotura
σ_c	Resistência à compressão uniaxial da rocha
σ'_c	Resistência à compressão simples da rocha intacta
σ_t	Resistência de carga pontual
σ_v	Tensão vertical máxima
ϕ_r	Ângulo de atrito interno
λ	Frequência de descontinuidades

(página propositadamente em branco)

Capítulo I

Introdução geral

Introdução geral

1.1. Âmbito e enquadramento geral da investigação

1.2. Objetivos

1.3. Organização da dissertação

1.4. Metodologias e técnicas: breve síntese

(página propositadamente em branco)

1. Introdução geral

"Theory is the language by means of which lessons of experience can be clearly expressed"

Karl von Terzghi (1957)

1.1. Âmbito e enquadramento geral da investigação

O presente documento insere-se na unidade curricular de Dissertação/Estágio/Projeto, do 2º ano do Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente (MEGG), do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG), do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), pertencente ao Instituto Politécnico do Porto (IPP).

O projeto de estágio baseia-se no estudo da compartimentação de maciços rochosos para a posterior aplicação de classificações geomecânicas que, aliada a um Sistema de Informação Geográfica (SIG) e a ferramentas geo-informáticas, permitiu desenvolver uma cartografia aplicada detalhada do local e a sua modelação a três dimensões. Esta dissertação foi realizada ao longo dos meses março a setembro de 2022, no âmbito de um projeto de estágio na empresa BRITAFIEL – Agregados e Ornamentais SA e no centro de consultadoria especializada e I&D LABCARGA | ISEP – Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada do ISEP, permitindo conciliar trabalho de campo, de gabinete e de laboratório (ver figura 1).

A Pedreira do Poço Negro, propriedade da empresa BRITAFIEL – Agregados e Ornamentais SA, produz agregado e rocha ornamental, comprovando que, na sua área de explorações, existem diferenças significativas na compartimentação do maciço rochoso. O presente documento foca no estudo dessas diferenças, para a consequente cartografia e modelação da pedreira. Para tal, a empresa concordou na realização de visitas de campo, recolha de dados geológico-geotécnicos e geomecânicos, registos fotográficos e a disponibilização de documentos essenciais para o desenvolvimento da dissertação.

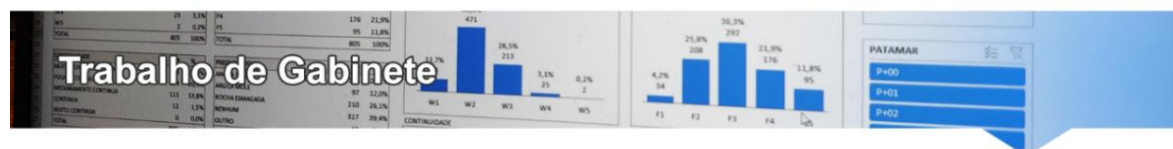
Numa primeira fase, foram realizadas visitas de campo com vista a reconhecer os diferentes aspetos legais e constrangimentos ambientais da pedreira. Mais tarde, sucedeu-se a novas visitas de campo, com o intuito de aplicar a técnica da amostragem linear, ou *"Scanline Sampling Technique"*, ou simplesmente conhecida como método de cartografia por *"scanlines"* (e.g., ISRM, 1978; Oliveira, 1987; Lamas, 1989; Priest, 1993; Dinis da Gama, 1995; Chaminé & Gaspar, 1995; Hutchinson, 2001; Brady & Brown, 2004; Martins et al., 2006; Chaminé et al., 2013, 2015, 2016, 2021; Chaminé, 2016; Chaminé & Fernandes, 2023; Fernandes & Chaminé, 2023), que permite estudar a compartimentação do maciço rochoso ao nível dos diferentes parâmetros geológico-geotécnicos

(ISRM, 1978, 1981; GSE, 1995; CFCCF, 1996; NAP, 2020) e à avaliação da resistência do maciço rochoso (ISRM, 2007, 2015). Numa etapa seguinte, procedeu-se à organização, análise e tratamento dos dados recolhidos em campo com finalidade de desenvolver uma cartografia aplicada e modelação em três dimensões dos zonamentos geotécnico e geomecânico da exploração.



Trabalho de Campo

- Avaliação geológica, geomorfológica e geotécnica preliminar do maciço rochoso;
- Aplicação da técnica da amostragem linear (TAL) para posterior preenchimento da ficha de levantamento geológico-geotécnico;
- Realização do ensaio esclerométrico e preenchimento da ficha de levantamento geomecânico.



Trabalho de Gabinete

- Investigações sobre a compartimentação do maciço rochoso do Poço Negro;
- Avaliação do grau de compartimentação do maciço rochoso;
- Estudo geomecânico do maciço rochoso do Poço Negro;
- Aplicação de sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos.



Trabalho de Laboratório

- Cartografia e modelação tridimensional da Pedreira do Poço Negro;
- Cartografia do zonamento geotécnico da exploração;
- Cartografia do zonamento geomecânico da exploração.

Figura 1 - Tarefas realizadas em campo, em gabinete e em laboratório.

1.2. Objetivos

O objetivo primordial da dissertação é estabelecer uma ligação multidisciplinar entre duas componentes principais. A componente geológico-geotécnica e geomecânica do maciço rochoso, que permitirá estudar o georrecurso quanto às suas competências em termos geotécnicos, e a componente de cartografia SIG aliada a ferramentas geo-informáticas, que, tomando partido dos elementos geológicos e geotécnicos, possibilitam o desenvolvimento de representações gráficas e técnicas de geovisualização, facilitando, assim, a sua compreensão e enquadramento do local em estudo. As metas fulcrais do documento encontram-se refletidas sucintamente no fluxograma presente na figura 2.

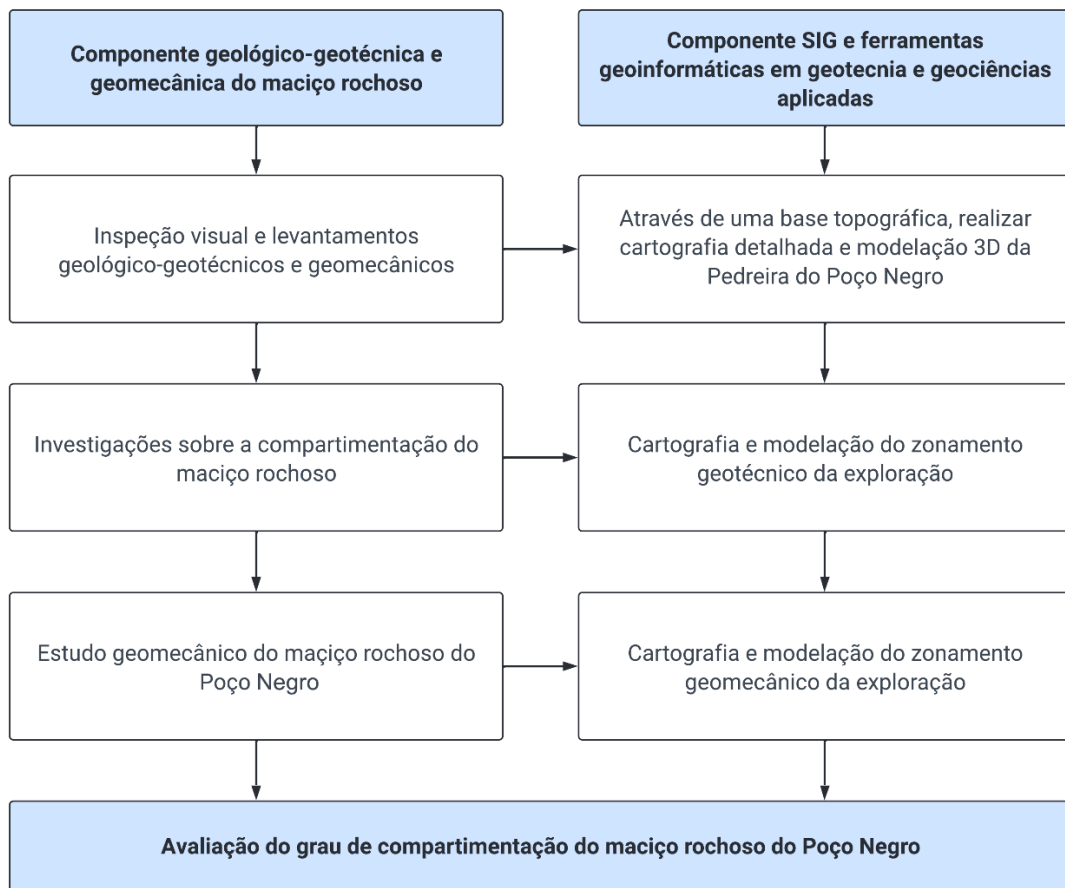


Figura 2 - Fluxograma representativo dos objetivos principais da dissertação.

1.3. Organização da dissertação

No presente subtópico serão apresentados e explicados sucintamente os capítulos desenvolvidos ao longo da dissertação (figura 3).

- **Capítulo I** – No primeiro capítulo são apresentadas as ideias gerais da dissertação, com especial destaque aos objetivos e às metodologias e técnicas que serão abordadas.
- **Capítulo II** – No segundo tópico é apresentado um breve estado de arte e generalidades relativas à caracterização e avaliação geológico-geotécnica e geomecânica dos maciços rochosos, enfatizando os principais índices geológico-geotécnicos e sistemas de classificação geomecânica, nomeadamente o *Rock Quality Designation – RQD* (Deere, 1963; Deere et al., 1967), o *Rock Mass Rating – RMR* (Bieniawski, 1973, 1989, 1993; Celada et al., 2014; Celada & Bieniawski, 2020), *Q-system* (Barton et al., 1974, 1980; NGI, 2015), o *Geological Strength Index – GSI* (Hoek et al., 1998, 2013), a *Surface Rock Classification – SRC* (González de Vallejo, 1983, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011) e o *Rock Mass Index – RMI* (Palmström, 1995, 1996a,b; Palmström & Stille, 2010, 2014).
- **Capítulo III** – O terceiro capítulo tem um enfoque nos sistemas de informação geográfica (SIG) e ferramentas geo-informáticas destinadas ao uso em geotecnia, geologia de engenharia e

geociências aplicadas, apresentando conceitos e noções básicas acerca do tema, metodologias na sua implementação e a importância da sua utilização na cartografia de zonamento geotécnico orientada para recursos geológicos.

- **Capítulo IV** – Neste tópico é apresentado o caso de estudo, onde é utilizada a informação recolhida em campo para o desenvolvimento de cartografia detalhada, em termos de geologia, geotecnia e geomecânica, e modelação de terreno em três dimensões da Pedreira do Poço Negro, integrando investigações sobre a compartimentação do maciço rochoso e o seu estudo geomecânico.

- **Capítulo V** – O quinto capítulo apresenta as observações finais relacionadas com o caso estudo, bem como algumas perspectivas para o futuro.

- **Capítulo VI** – No capítulo final são listadas as referências bibliográficas, fulcrais para o desenvolvimento do documento.



Capítulo I - Introdução geral

- 1.1. Âmbito e enquadramento geral da investigação
- 1.2. Objetivos
- 1.3. Organização da dissertação
- 1.4. Metodologias e técnicas: breve síntese



Capítulo II - Caracterização geológico-geotécnica do maciço rochoso

- 2.1. Generalidades
- 2.2. Cartografia geológico-geotécnica das superfícies expostas do maciço rochoso
- 2.3. Compartimentação dos maciços rochosos: parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos
- 2.4. Sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos



Capítulo III - SIG e ferramentas geoinformáticas em geotecnia e geociências aplicadas

- 3.1. Conceitos básicos da cartografia geotécnica
- 3.2. Caracterização, classificação e conteúdo dos mapas geotécnicos
- 3.3. Importância da cartografia de zonamento geotécnico e geomecânico em recursos geológicos
- 3.4. Sistemas de informação geográfica (SIG)



Capítulo IV - Caso de estudo: Geotecnia e geomecânica da exploração do Poço Negro (Penafiel) para a criação de uma cartografia geotécnica do recurso pétreo

- 4.1. Pedreira do Poço Negro: enquadramentos regional e local
- 4.2. Pedreira do Poço Negro: aspetos legais da exploração e constrangimentos ambientais
- 4.3. Cartografia e modelação 3D da Pedreira do Poço Negro
- 4.4. Investigações sobre a compartimentação do maciço rochoso do Poço Negro
- 4.5. Blocometria e qualidade do maciço rochoso do Poço Negro
- 4.6. Estudo geomecânico do maciço rochoso do Poço Negro
- 4.7. Avaliação do grau de compartimentação do maciço rochoso: implicações na gestão racional do georrecurso



Capítulo V - Conclusões

- 5.1. Considerações finais
- 5.2. Perspetivas futuras



Capítulo VI - Referências bibliográficas

Figura 3 - Sequência dos capítulos abordados na dissertação.

1.4. Metodologias e técnicas: breve síntese

Para o desenvolvimento da dissertação, foram consultados documentos cartográficos genéricos e aplicadas uma série de metodologias e técnicas relacionadas com parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos do maciço rochoso.

1.4.1. Documentos cartográficos

Os documentos cartográficos genéricos, a diversas escalas, consultados ao longo da dissertação foram:

- Carta Militar de Portugal, à escala 1:25.000, Série M888: folha 124 (Marco de Canaveses). (CIGeoE, 2009);
- Carta uso de solos, Planta de ordenamento e planta de condicionantes centro do PDM em vigor de Penafiel (C. M. Penafiel)¹;
- Carta geológica de Portugal, folha 9-D Penafiel, à escala 1:50 000, e respetiva notícia explicativa (Medeiros et al., 1981b);
- Documentação gentilmente fornecida pela administração da BRITAFIEL – Agregados e Ornamentais, SA, através do seu departamento técnico de produção.

1.4.2. Técnica da Amostragem Linear

Para a avaliação da compartimentação dos maciços rochosos, foi utilizada a Técnica da Amostragem Linear (TAL), um método de reconhecimento geológico-geotécnico esboçado nos anos 60, do século XX, por Ruth Terzaghi (Terzaghi, 1965) e apresentado e desenvolvido com mais pormenor por Priest & Hudson (1976, 1981), Hudson & Priest (1983) e Priest (1993, 2004), posteriormente aplicado por diversos autores em diversos contextos geológicos, geotécnicos e mineiros (de destacar, por exemplo, Goodman, 1976; Dinis da Gama & Afonso, 1993; Dinis da Gama, 1995; Chaminé & Gaspar, 1995; Wu & Pollard, 1995; Hutchinson, 2001; Mauldon et al., 2001; Rohrbaugh et al., 2002; Peacock, 2006; Martins et al., 2006; Brady & Brown, 2007; Zeeb et al., 2013; Mahé et al., 2015; Watkins et al., 2015; Chaminé et al., 2015, 2021; Chaminé, 2016; Chaminé & Fernandes, 2023). Para além da técnica referida, existem outros procedimentos com finalidades semelhantes para avaliar a fraturação de uma dada área amostral, nomeadamente, a amostragem em *malha retangular* (Pahl, 1981; Priest, 1993) e o método de amostragem *circular* (Mauldon et al., 2001; Rohrbaugh et al., 2002; Watkins et al., 2015).

No quadro 1 estão presentes generalidades da “*Scanline Sampling Technique*”, o método de aplicação, uma representação esquemática do exercício amostral e particularidades no registo dos dados de campo.

¹ + info: <https://www.cm-penafiel.pt/municipio-de-penafiel/informacao-municipal/pdm-plano-diretor-municipal/pdm-em-vigor/>


Quadro 1 - Características da técnica da amostragem linear aquando da sua aplicação em maciços rochosos fraturados (adaptado de ISRM, 1981; Priest & Hudson, 1981; Hudson & Priest, 1983; Priest, 1993; Mauldon et al., 2001; Rohrbaugh et al., 2002; Priest, 2004; Brady & Brown, 2007; Peacock, 2006; Fonseca et al., 2010; Chaminé et al., 2010, 2013, 2014; Galiza et al., 2011; Chaminé, 2016).

Generalidades																																																		
<p>A técnica da amostragem linear é uma abordagem fácil, rápida e precisa de recolha de dados de descontinuidades (e.g., Priest and Hudson, 1981; Hudson and Priest, 1983; Priest, 1993; Mauldon et al., 2001; Rohrbaugh et al., 2002; Priest, 2004; Peacock, 2006; Chaminé et al., 2010, 2013; Pinheiro et al., 2014a). A sua aplicação proporciona uma quantidade de informação fiável sobre a geologia estrutural, características petrofísicas e geotécnicas dos maciços rochosos, empregue quer em furos ou superfícies rochosas expostas.</p>																																																		
Aplicação																																																		
<p>A aplicação da "scanline sampling technique" consiste na colocação de uma fita métrica graduada em faces expostas do maciço, a uma altura constante ao longo de todo o seu comprimento, procedendo ao registo de características geométricas e mecânicas ao interseção de descontinuidades, nomeadamente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • D - Distância à origem da fita graduada; • L - semi-comprimento exposto (comprimento visível da interseção da descontinuidade com face exposta de rocha sobre a fita graduada); • T - tipo de terminação que apresenta a extremidade da descontinuidade (R - na rocha; D - noutra descontinuidade ou O - obscura); • Atitude geológica da descontinuidade, medida no ponto de interseção da linha de amostragem com a descontinuidade; • C - Curvatura, numa escala de 1 a 5 (1 - superfície plana, ..., 5 - superfície muito curva); • R - Rugosidade; • Outras características das descontinuidades, como abertura (mm), tipo de preenchimento, presença de água, ou outros parâmetros de relevância. <p>No preenchimento da ficha de levantamento geológico-geomecânico, é recomendado registar a orientação do talude e da scanline, o sentido de leitura, a unidade geológica, a zona geotécnica, a altura da scanline em relação à superfície, a data de preenchimento e a rubrica do responsável pelo levantamento.</p>																																																		
Representação gráfica																																																		
<p>Esquema da técnica da amostragem linear para levantamento de descontinuidades (adaptado de: Brady & Brown, 2007).</p>																																																		
Registo de dados																																																		
<p>Os dados são registados na ficha de levantamento geológico-geomecânico <i>in situ</i>, posteriormente analisados e estruturados na base de dados dinâmica SCANGEO-DATA/BGD v3.0 (Fonseca et al., 2010; Galiza et al., 2011; Chaminé et al., 2013, 2014).</p>																																																		
<p>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA</p> <p>FICHA DE LEVANTAMENTO GEOLÓGICO-GEOMECÂNICO Técnica de Amostragem Linear (Scanline)</p> <p>ORIENTAÇÃO: do talude: N E UNIDADE GEOLÓGICA: NOME(S): LOCALIZAÇÃO: PEDREIRA: PEGARIBANCA: DATA: / / CÓDIGO (00):</p> <p>SENTIDO: ALTURA À "SCANLINE"/SOLO (m): DATA: / /</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">DESCONTINUIDADE NÚMERO</th> <th rowspan="2">DISTÂNCIA À ORIGEM (D)</th> <th rowspan="2">LITOLOGIA</th> <th rowspan="2">TIPO DE DESCONTINUIDADE</th> <th rowspan="2">ALTITUDE</th> <th rowspan="2">GRAU DE ALTERAÇÃO</th> <th rowspan="2">GRAU DE FRACTURAÇÃO</th> <th rowspan="2">ABERTURA</th> <th rowspan="2">TIPO DE ENCHIMENTO</th> <th rowspan="2">RUGOSIDADE</th> <th rowspan="2">CONTINUIDADE</th> <th rowspan="2">TERMINAÇÃO</th> <th rowspan="2">CURVATURA</th> <th rowspan="2">PRESENÇA DE ÁGUA</th> </tr> <tr> <th>W₁, W₂, W₃, W₄</th> <th>F₁, F₂, F₃, F₄</th> <th>Fechada</th> <th>Aberta</th> <th>Muito Aberta</th> <th>Vertical</th> <th>Horizontal</th> <th>Plana</th> <th>Rocha</th> <th>Obscura</th> <th>D</th> <th>R</th> <th>O</th> <th>C₁</th> <th>C₂</th> <th>C₃</th> <th>C₄</th> <th>Seco</th> <th>Água</th> <th>Geopelotas</th> <th>Flores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>(m)</td> <td>(m)</td> <td></td> <td>Faixa Fractura Foliação Estrutura Filoniana Outra</td> <td>N E Q</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		DESCONTINUIDADE NÚMERO	DISTÂNCIA À ORIGEM (D)	LITOLOGIA	TIPO DE DESCONTINUIDADE	ALTITUDE	GRAU DE ALTERAÇÃO	GRAU DE FRACTURAÇÃO	ABERTURA	TIPO DE ENCHIMENTO	RUGOSIDADE	CONTINUIDADE	TERMINAÇÃO	CURVATURA	PRESENÇA DE ÁGUA	W ₁ , W ₂ , W ₃ , W ₄	F ₁ , F ₂ , F ₃ , F ₄	Fechada	Aberta	Muito Aberta	Vertical	Horizontal	Plana	Rocha	Obscura	D	R	O	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	Seco	Água	Geopelotas	Flores	(m)	(m)		Faixa Fractura Foliação Estrutura Filoniana Outra	N E Q									
DESCONTINUIDADE NÚMERO	DISTÂNCIA À ORIGEM (D)															LITOLOGIA	TIPO DE DESCONTINUIDADE	ALTITUDE	GRAU DE ALTERAÇÃO	GRAU DE FRACTURAÇÃO	ABERTURA	TIPO DE ENCHIMENTO	RUGOSIDADE	CONTINUIDADE	TERMINAÇÃO	CURVATURA	PRESENÇA DE ÁGUA																							
		W ₁ , W ₂ , W ₃ , W ₄	F ₁ , F ₂ , F ₃ , F ₄	Fechada	Aberta	Muito Aberta	Vertical	Horizontal	Plana	Rocha	Obscura	D	R	O	C ₁													C ₂	C ₃	C ₄	Seco	Água	Geopelotas	Flores																
(m)	(m)		Faixa Fractura Foliação Estrutura Filoniana Outra	N E Q																																														
<p>Ficha de levantamento geológico-geomecânico (LABCARGA ISEP)</p>																																																		

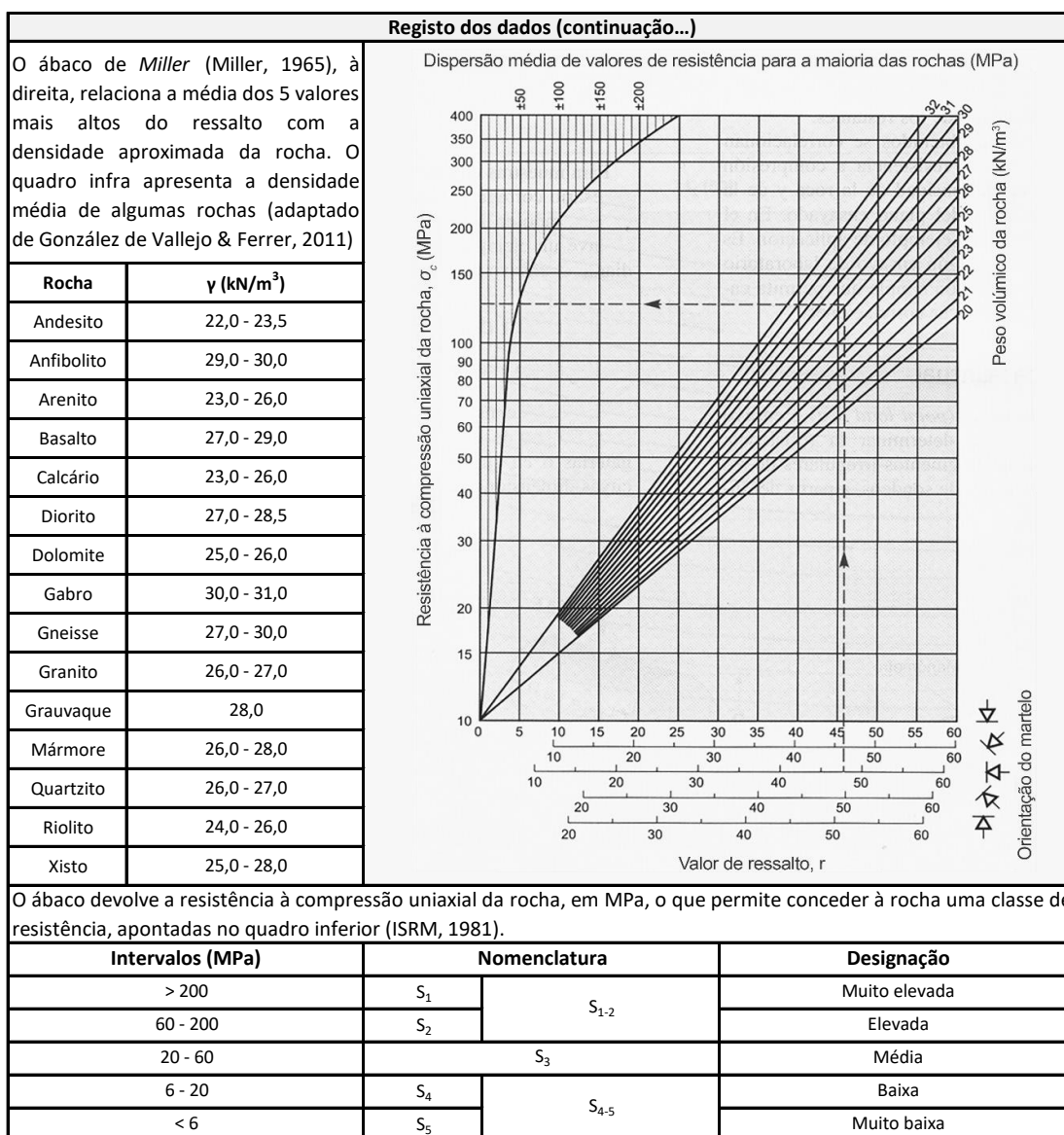
1.4.3. Ensaio esclerométrico com martelo de Schmidt, tipo L

O esclerómetro portátil, mais concretamente o martelo de *Schmidt*, é uma ferramenta simples, expedita e económica, de pequenas dimensões, cuja utilização é recorrente em geologia de engenharia e geotecnia de maciços rochosos (pormenores em Aydin & Basu, 2005; Aydin, 2015). O quadro 2 apresenta as generalidades, as características e os princípios de funcionamento do equipamento e meios de registo de dados relativos ao martelo de *Schmidt*.

Quadro 2 - Ensaio de avaliação da resistência mecânica do maciço rochoso recorrendo ao esclerómetro portátil, ou martelo de *Schmidt* - tipo L (adaptado de Schmidt, 1951; Miller, 1965; Farmer, 1968; ISRM, 1981; Rahn, 1986; Goodman, 1989; Cargill & Shakoor, 1990; Waltham, 2002; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Generalidades																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
A resistência da matriz rochosa pode ser estimada a partir de índices de campo e correlações com dados de ensaios realizados in situ, ou através do esclerómetro portátil, ou martelo de <i>Schmidt</i> . Este equipamento foi desenvolvido originalmente para um estudo da resistência do betão (Schmidt, 1951), e mais tarde foi adotado o seu uso em rochas (Cargill & Shakoor, 1990).																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Características do equipamento e princípios de funcionamento																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
O martelo de Schmidt pode ser de dois modelos, o tipo N, utilizado maioritariamente no estudo de betão, e o tipo L, mais empregue na estimativa da resistência de maciços rochosos. A figura representa o esclerómetro utilizado no decorrer do projeto (<i>proceq</i> , tipo L).																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
A sua utilização consiste na colocação do equipamento na perpendicular face à superfície rochosa, devolvendo o valor de ressalto, ou " <i>rebound</i> " (R) de uma massa de aço no interior do equipamento, quando se dá o seu impacto com a rocha. O valor do ressalto pode ser lido numa régua que se encontra na parte lateral do equipamento. O martelo pode ser colocado horizontalmente, perpendicularmente ou obliquamente à superfície da rocha, devendo anotar a sua posição na ficha de levantamento geomecânico, uma vez que esta terá impacto na leitura da resistência recorrendo ao ábaco de <i>Miller</i> (Miller, 1965). A superfície da rocha deverá ser lisa, e isenta de fissuras e materiais resultantes da meteorização da mesma. A presença de água na superfície pode reduzir o valor do ressalto pelo que se deve realizar o ensaio, sempre que possível, numa face seca da rocha.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Registo dos dados																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
O dados são registados na ficha de levantamento geomecânico, onde deverão ser devidamente anotadas a estação geomecânica, a posição do equipamento e 10 valores de ressalto. Estes dados serão armazenados no aplicativo geoinformática <i>SCHMIDT-DATA/UCS 3.0</i> , uma calculadora associada à <i>GEOTECH/CALC-TOOLS 3.0</i> . De modo a gerar resultados mais fidedignos, os 5 valores de ressalto mais baixos não são contabilizados (ISRM, 1981), e os disparos devem ser efetuados em locais próximos, mas diferentes dos restantes (no caso de se realizarem 12 disparos, eliminam-se os 6 mais baixos). O valor utilizado para o ábaco de <i>Miller</i> (Miller, 1965) é a média dos 5 resultados restantes.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="14">FICHA DE LEVANTAMENTO GEOMECÂNICO</th> <th colspan="1">CÓDIGO (B):</th> </tr> <tr> <th colspan="14">Esclerómetro Portátil (Martelo de Schmidt, Proceq Tipo L)</th> <th colspan="1"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">ORIENTAÇÃO:</td> <td colspan="2">do talude: N E</td> <td colspan="2">UNIDADE GEOLÓGICA:</td> <td colspan="2">NOME(S):</td> <td colspan="6">LOCALIZAÇÃO:</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">da "scanline": N E</td> <td colspan="2">ALTURA À "SCANLINE"/SOLO (m):</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="6">PEDREIRA:</td> </tr> <tr> <td colspan="2">SENTIDO:</td> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">ZONA GEOTÉCNICA:</td> <td colspan="2">DENSIDADE DA ROCHA (kN/m³):</td> <td colspan="2">DATA: / /</td> <td colspan="5">PEGA/BANCADA:</td> </tr> <tr> <th rowspan="3">ESTAÇÃO GEOMECÂNICA</th> <th rowspan="3">Número</th> <th colspan="2">DISTÂNCIA À ORDEM (centímetros)</th> <th rowspan="3">LITOLOGIA</th> <th colspan="2">ATTITUDE</th> <th colspan="4">GRAU DE ALTERAÇÃO (ESRM, 1978, 1981; GSE, 1995)</th> <th rowspan="3">ORIENTAÇÃO DO MARTELO SCHMIDT (TIPO L)</th> <th colspan="10">VALOR DO ENSAIO DE PERCUSSÃO (RESSALTO, REBOUND, R)</th> <th rowspan="3">OBSERVAÇÕES</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th rowspan="2">Direção</th> <th rowspan="2">Inclinação</th> <th rowspan="2">W₁</th> <th rowspan="2">W₂</th> <th rowspan="2">W₃</th> <th rowspan="2">W₄</th> <th rowspan="2">W₅</th> <th colspan="10"></th> </tr> <tr> <th colspan="2">(m)</th> <th colspan="2">N (°) E (°) Q</th> <th colspan="2">SI ou Não Alterada</th> <th colspan="2">Levemente Alterada</th> <th colspan="2">Mediamente Alterada</th> <th colspan="2">Muito Alterada</th> <th colspan="2">Completamente Alterada</th> <th colspan="10">VALOR MÉDIO DO RESSALTO, R (segundo a norma proposta pela ISRM, 1978 e ASTM, 2001)</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="10">RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAIXIAL, UCS</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="10">CLASSE DE RESISTÊNCIA (ISRM, 1981)</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="10">S₁ S₂ S₃ S₄ S₅</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="10">60-200 Muito Elevada</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="10">20-60 Média</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="10">6-20 Baixa</th> </tr> <tr> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="2"></th> <th colspan="10">1-6 Muito Baixa</th> </tr> </tbody> </table>															FICHA DE LEVANTAMENTO GEOMECÂNICO														CÓDIGO (B):	Esclerómetro Portátil (Martelo de Schmidt, Proceq Tipo L)															ORIENTAÇÃO:		do talude: N E		UNIDADE GEOLÓGICA:		NOME(S):		LOCALIZAÇÃO:								da "scanline": N E		ALTURA À "SCANLINE"/SOLO (m):				PEDREIRA:						SENTIDO:				ZONA GEOTÉCNICA:		DENSIDADE DA ROCHA (kN/m³):		DATA: / /		PEGA/BANCADA:					ESTAÇÃO GEOMECÂNICA	Número	DISTÂNCIA À ORDEM (centímetros)		LITOLOGIA	ATTITUDE		GRAU DE ALTERAÇÃO (ESRM, 1978, 1981; GSE, 1995)				ORIENTAÇÃO DO MARTELO SCHMIDT (TIPO L)	VALOR DO ENSAIO DE PERCUSSÃO (RESSALTO, REBOUND, R)										OBSERVAÇÕES			Direção	Inclinação	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅											(m)		N (°) E (°) Q		SI ou Não Alterada		Levemente Alterada		Mediamente Alterada		Muito Alterada		Completamente Alterada		VALOR MÉDIO DO RESSALTO, R (segundo a norma proposta pela ISRM, 1978 e ASTM, 2001)																										RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAIXIAL, UCS																												CLASSE DE RESISTÊNCIA (ISRM, 1981)																												S ₁ S ₂ S ₃ S ₄ S ₅																												60-200 Muito Elevada																												20-60 Média																												6-20 Baixa																												1-6 Muito Baixa									
FICHA DE LEVANTAMENTO GEOMECÂNICO														CÓDIGO (B):																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Esclerómetro Portátil (Martelo de Schmidt, Proceq Tipo L)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
ORIENTAÇÃO:		do talude: N E		UNIDADE GEOLÓGICA:		NOME(S):		LOCALIZAÇÃO:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
		da "scanline": N E		ALTURA À "SCANLINE"/SOLO (m):				PEDREIRA:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
SENTIDO:				ZONA GEOTÉCNICA:		DENSIDADE DA ROCHA (kN/m³):		DATA: / /		PEGA/BANCADA:																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
ESTAÇÃO GEOMECÂNICA	Número	DISTÂNCIA À ORDEM (centímetros)		LITOLOGIA	ATTITUDE		GRAU DE ALTERAÇÃO (ESRM, 1978, 1981; GSE, 1995)				ORIENTAÇÃO DO MARTELO SCHMIDT (TIPO L)	VALOR DO ENSAIO DE PERCUSSÃO (RESSALTO, REBOUND, R)										OBSERVAÇÕES																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
					Direção	Inclinação	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄		W ₅																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
		(m)											N (°) E (°) Q		SI ou Não Alterada		Levemente Alterada		Mediamente Alterada		Muito Alterada		Completamente Alterada		VALOR MÉDIO DO RESSALTO, R (segundo a norma proposta pela ISRM, 1978 e ASTM, 2001)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
																RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAIXIAL, UCS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
																		CLASSE DE RESISTÊNCIA (ISRM, 1981)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
																		S ₁ S ₂ S ₃ S ₄ S ₅																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
																		60-200 Muito Elevada																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
																		20-60 Média																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
																		6-20 Baixa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
																		1-6 Muito Baixa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Ficha de levantamento geomecânico (LABCARGA ISEP)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											

Quadro 2 – (continuação...)



1.4.4. Aplicativos informáticos: GEOTECH|CALC-TOOLS e MGC-RocDesign|CALC

O aplicativo geo-informático *GEOTECH|CALC-TOOLS* (Fonseca et al., 2010; Chaminé et al., 2016; Ramos, 2022) engloba as ferramentas *SCANGEO-DATA|BDG* e *SCHMIDT-DATA|UCS* (Fonseca et al., 2010; Chaminé et al., 2016; Ramos, 2022) e a calculadora *MGC-RocDesign|CALC 1.0* (Pinheiro, 2013; Pinheiro et al., 2014b; Chaminé et al., 2016). No decorrer da dissertação o aplicativo geo-informático *GEOTECH|CALC-TOOLS v.2.0* foi revista, corrigida e atualizada algumas das suas funcionalidades, especialmente a componente estatística, sua visualização e a interface com o utilizador², sendo, assim, usado o *GEOTECH|CALC-TOOLS v.3.0*.

² De registar o constante apoio do Doutor Luís Ramos (DEG|ISEP), um dos criadores do aplicativo geo-informático *GEOTECH|CALC-TOOLS* na sua versão 1.0 (pormenores, por exemplo, em Ramos, 2008; Fonseca et al., 2010; Chaminé et al., 2016) e na sua recente versão melhorada, versão 2.0 (pormenores em Ramos, 2022). Sem a sua intervenção, auxílio e interação não teria sido possível a presente versão revista e atualizada, a *GEOTECH|CALC-TOOLS v.3.0*.

A SCANGEO-DATA/BGD v.3.0 (figura 4) consiste numa ferramenta informática robusta que permite compilar, organizar, analisar e avaliar os dados de campo relativos aos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (ISRM, 1978, 1981; GSE, 1995; CFCFF, 1996; NAP, 2020), facilitando, por exemplo, a determinação e análise estatística das famílias de descontinuidades, e, ainda, a análise estatística de todos os parâmetros geológico-geotécnicos através de representações estatísticas gráficas.

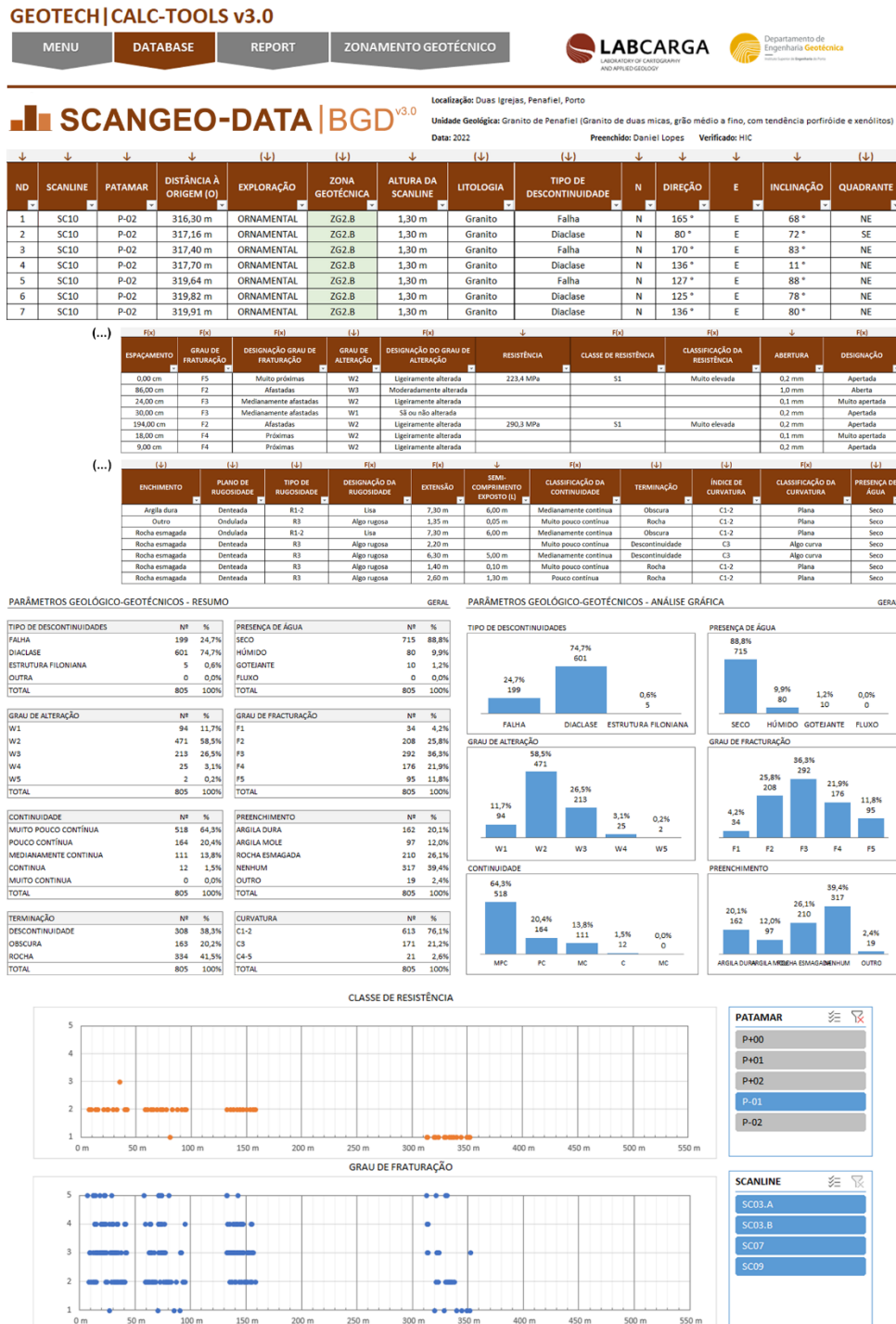


Figura 4 - Exemplo da aplicação geo-informática SCANGEO-DATA/BGD v.3.0: uma ferramenta para o tratamento e análise estatística dos parâmetros geológico-geotécnicos (adaptado de: Fonseca et al., 2010; Chaminé et al., 2016; Ramos, 2022).

A aplicação *SCANGEO-DATA/BGD v.3.0* foi desenvolvida em *Ms. Excel*, de modo a auxiliar na organização, automatização e visualização dos dados, e tal como referido foi aprimorada em relação à sua versão 2.0 (pormenores em Chaminé et al., 2016; Ramos, 2022).

A ferramenta *SCHMIDT-DATA/UCS v.3.0* (figura 5), foi também desenvolvida em *Ms. Excel*, permitindo ao utilizador inserir os dados relativos aos ensaios geomecânicos realizados em campo e determinar a designada “dureza de Schmidt” (Aydin, 2015). Assim, a partir do peso volúmico do material-rocha, da orientação do esclerómetro portátil (tipo L) e o valor de ressalto (“rebound”) (quadro 2), com recurso a uma adaptação digital do ábaco de Miller (Miller, 1965), é possível estimar a resistência à compressão uniaxial da rocha (ISRM, 1978, 1981).

GEOTECH | CALC-TOOLS v3.0 **LABCARGA** **Departamento de Engenharia Geotécnica**

SCHMIDT-DATA | UCS v3.0 **Localização:** Duas Igrejas, Penafiel, Porto
Unidade Geológica: Granito de Penafiel (Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos)
Data: 2022 **Preenchido:** Daniel Lopes **Verificado:** HIC

DADOS GÉNICOS DA ESTAÇÃO GEOMECÂNICA				ATTITUDE GEOLÓGICA				GRAU DE ALTERAÇÃO [W] (ISRM, 1978, 1981; GSE, 1995)					ORIENTAÇÃO DO MARTELO SCHMIDT (TIPO L)					
ID: ESTAÇÃO GEOMECÂNICA	Scanline	DISTÂNCIA À ORIGEM (Scanline - m)	LITOLOGIA	N	[°]	E	[°]2	Q	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅	↓	↙	←	↘	↑
1	SC10	316,00 m	Granito						X									X
2	SC10	319,00 m	Granito							X								X
3	SC10	322,00 m	Granito						X									X
4	SC10	325,00 m	Granito							X								X
5	SC10	328,00 m	Granito							X								X
6	SC10	331,00 m	Granito							X								X

ENSAIO ESCLEROMETRICO: VALOR DO RESSALTO (REBOUND, R) ("Dureza de Schmidt", R)										RESISTENCIA A COMPRESSÃO (UCS) (MPa)					CLASSE DE RESISTÊNCIA (S) (ISRM, 1981)					OBSERVAÇÕES		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	UCS1	UCS2	UCS3	UCS4	UCS5	MÉDIA UCS (Mpa)	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S	OBSERVAÇÕES
62,0	61,0	55,0	54,0	60,0	54,0	58,0	58,0	50,0	60,0	245,8	232,8	220,4	220,4	197,6	223,4	X					1	
66,0	62,0	64,0	60,0	64,0	64,0	62,0	63,0	60,0	67,0	323,0	305,8	274,2	274,2	274,2	290,3	X					1	
68,0	62,0	66,0	60,0	63,0	69,0	70,0	70,0	65,0	68,0	380,5	380,5	360,2	341,1	341,1	360,7	X					1	
77,0	68,0	70,0	66,0	68,0	67,0	63,0	60,0	66,0	65,0	557,6	380,5	341,1	341,1	323,0	388,6	X					1	
65,0	70,0	66,0	70,0	68,0	68,0	70,0	72,0	64,0	70,0	424,4	380,5	380,5	380,5	380,5	389,2	X					1	
(...)	48,0	49,0	52,0	46,0	52,0	36,0	43,0	41,0	41,0	142,4	142,4	142,4	120,9	114,5	132,5		X				2	

Figura 5 - Exemplo ilustrativo da base de dados geomecânica *SCHMIDT-DATA/UCS v.3.0* (adaptado de Fonseca et al., 2010; Chaminé et al., 2016; Ramos, 2022).

A *MGC-RocDesign/CALC v.1.0* (Pinheiro, 2013; Pinheiro et al., 2014b; Chaminé et al., 2016) trata-se de uma ferramenta geo-informática orientada para um estudo geomecânico do maciço rochoso, permitindo compilar e integrar todos os dados geológico-geotécnicos e geomecânicos recolhidos em campo, com destino à aplicação de índices geotécnicos e classificações geomecânicas (figura 6). A calculadora *MGC-RocDesign/CALC v1.0* (Pinheiro, 2013; Pinheiro et al., 2014b) floresce de uma base de dados em *Ms. Excel*, com a aplicação de *Visual Basic (VB)*.

Os índices geológico-geotécnicos disponíveis no aplicativo são o *RQD* (Deere, 1963; Deere et al., 1967; Deere & Deere, 1988), o *GSI* (Hoek & Brown, 1997; Hoek et al., 1998; Marinos & Hoek, 2000; Marinos et al., 2005; Hoek et al., 2013) e o índice hidrogeomecânico *HP-value* (Gates, 1997, 2003). As classificações geomecânicas que a ferramenta permite determinar são o *RSR* (Wickham et al., 1974; Skinner, 1988), *RMR* (Bieniawski, 1973, 1976, 1979, 1989, Celada & Bieniawski, 2020),

Q-system (Barton et al., 1974, 1980; Barton, 2006; NGI, 2015) e *SRC* (González de Vallejo, 1983, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

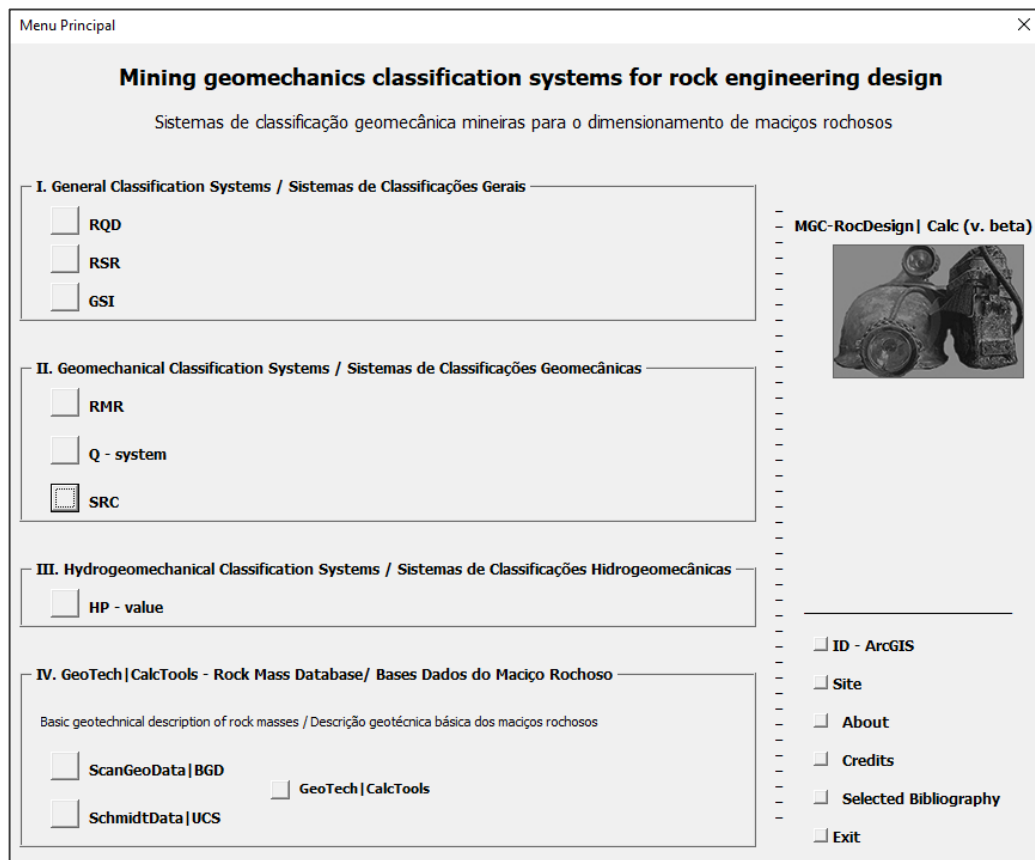


Figura 6 - Demonstração da ferramenta geo-informática *MGC-RocDesign | CALC v1.0* (Pinheiro, 2013; Pinheiro et al., 2014b; Chaminé et al., 2016).

1.4.5. SIG e ferramentas geo-informáticas

Para além do suporte cartográfico anteriormente mencionado, foram utilizadas as seguintes ferramentas geoespaciais para o desenvolvimento da dissertação.

1.4.5.1. GPS Trimble GeoExplorer GeoXH2005

O *Global Positioning System (GPS)*, ou sistema de posicionamento global, é um sistema de posicionamento de alta precisão, através de satélite operadas pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (*DoD*). O seu funcionamento depende da constelação de satélites operacionais *NAVSTAR*, que orbitam a terra a cada 12 horas, fornecendo, a uma escala global, informação sobre a posição (Trimble, 2007).

1.4.5.2. ESRI® ArcGIS

A ferramenta *ArcGIS* é um *software* SIG que permite tratar e analisar informação geográfica através de mapas organizados por camadas, desenvolvido pela empresa *ESRI*®. Este software geoespacial

será complementado pela aplicação *ArcScene*, uma extensão que possibilita visualizar os dados utilizados no *ArcGIS* em três dimensões.

1.4.5.3. *OCAD® for cartography v.11*

O *software OCAD®* trata-se de uma aplicação de origem Suíça utilizada em cartografia e orientação. As vantagens deste programa direcionadas para a cartografia encontram-se listadas na figura 7.



Permite utilizar dados de informação espacial já existentes para o mapa de base



Com recurso a GPS, localizador de alcance a laser e analisando modelos de elevação digital (DEM) ou dados LiDAR, é possível enriquecer o mapa



Atribuindo os dados a símbolos cartográficos, é possível utilizar ferramentas únicas de desenho, edição e generalização para produzir mapas detalhados



Permite alterar as características do mapa em diferentes representações sem afetar o documento original



O mapeador temático, um assistente passo-a-passo, ajuda a visualizar espacialmente um tema, uma área temática e dados estatísticos



Finaliza-se o mapa com um *layout* para impressão e exportação para posterior uso digital, possibilitando a criação de uma versão interativa na *web*

Figura 7 - Vantagens e funcionalidades do *software OCAD® for cartography v.11* (adaptado de <https://www.ocad.com>).

Capítulo II

Caracterização geológico-geotécnica do maciço rochoso

Caracterização geológico-geotécnica do maciço rochoso

2.1.

Generalidades

2.2.

Cartografia geológico-geotécnica das superfícies expostas do maciço

2.3.

Compartimentação dos maciços rochosos: parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos

2.4.

Sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos

(página propositadamente em branco)

2. Caracterização geológico-geotécnica do maciço rochoso

2.1. Generalidades

Em geologia, o termo ‘rocha’ pode ser definido como um agregado natural de minerais (Whitten & Brooks, 1972). As rochas e os solos são formados naturalmente, que, na prática da engenharia, são termos totalmente distintos (Hencher, 2015). Para fins de engenharia, os solos são formados essencialmente por partículas misturadas com fluidos e gases, enquanto as rochas são materiais naturais que se formam na crosta terrestre (Smith et al., 2001), geradas num ciclo geodinâmico contínuo, envolvendo processos internos e externos, ao longo do tempo geológico (e.g., Price, 2009; de Freitas, 2009), dividindo-se em rochas brandas, pouco resistentes e facilmente deformadas, e rochas duras, com pouca alteração e alta resistência (figura 8).

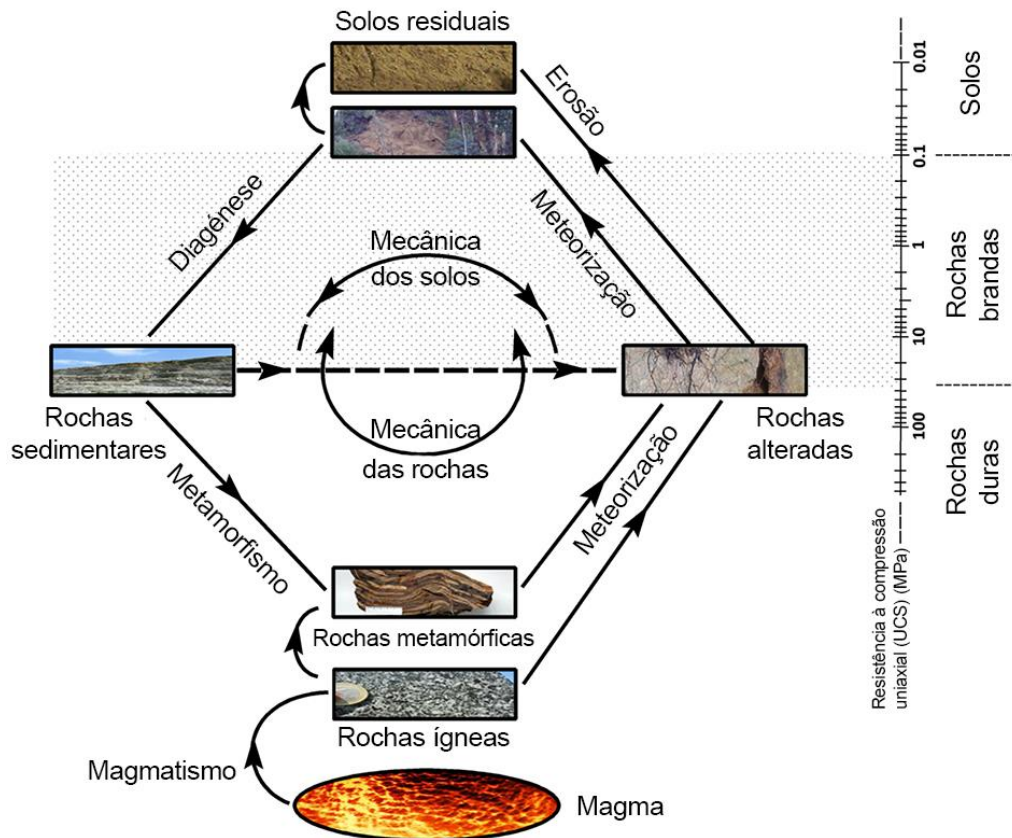


Figura 8 - O ciclo das rochas numa perspectiva da geoengenharia e das geociências de engenharia: uma visão que retrata as questões da mecânica das rochas e da mecânica dos solos (adaptado de Dobereiner & de Freitas, 1986). Segundo: Chaminé et al. (2013).

O comportamento das rochas, na perspectiva da engenharia, é fortemente influenciado pela presença e características de microestruturas geológicas (Hudson and Cosgrove, 1997; Smith, 2004; Barton & Quadros, 2015; Hudson, 2015; Cosgrove and Hudson, 2016). O maciço rochoso poder-se-á encarar como a matriz composta por material rochoso e as discontinuidades que as delimitam (Hoek, 2007).

2.2. Cartografia geológico-geotécnica das superfícies expostas do maciço rochoso

A técnica da amostragem linear (TAL) é uma abordagem fidedigna para uma cartografia das superfícies expostas (descontinuidades) dos maciços rochosos, tratando-se de um método expedito e versátil na recolha de dados geoestruturais (e.g. Priest & Hudson, 1976, 1981; Hudson & Priest, 1983; Priest, 1993; Dinis da Gama, 1995; Mauldon et al., 2001; Rohrbaugh et al., 2002; Priest, 2004; Peacock, 2006; Chaminé et al., 2010, 2013, 2015; Chaminé, 2016; Chaminé & Fernandes, 2023). Estes dados, referentes à geologia estrutural, características petrofísicas e geotécnicas dos maciços rochosos, podem ser estudados quer em testemunhos de rocha de sondagens, quer em superfícies expostas rochosas (e.g., Priest, 1993; Dinis da Gama, 1995; Peacock, 2006; Chaminé et al., 2015). Contudo, a TAL está sujeita a naturais limitações no que respeita a cartografia de descontinuidades horizontais e sub-horizontais. Esta limitação poderá ser ultrapassada, em parte, com inspeções visuais, que permitirão quantificar eventuais descontinuidades de baixo pendor.

A figura 9 representa um esquema da aplicação da técnica da amostragem linear (TAL), onde estão assinalados os parâmetros que esta permite avaliar, já descritos no quadro 1.

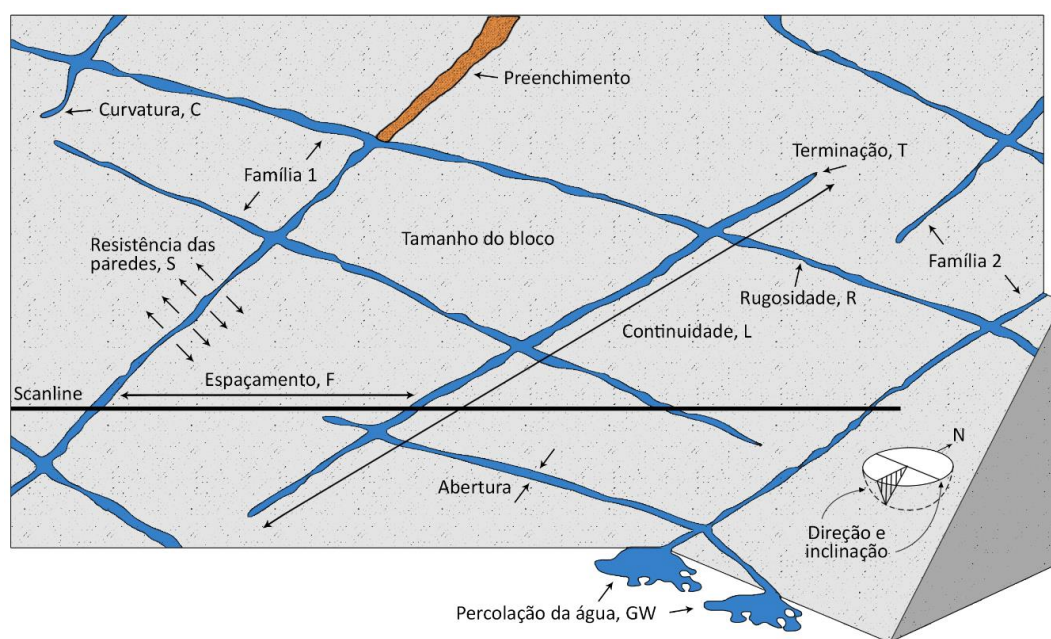


Figura 9 - Aplicação da técnica da amostragem linear (TAL) e parâmetros geológicos-geotécnicos (ISRM, 1978, 1981) (Segundo: Hudson & Harrison, 2000; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

A TAL permite recolher de uma forma racional os parâmetros geológicos, geotécnicos e geomecânicos num dado maciço rochoso fraturado considerando-se para o efeito várias estações geotécnicas. Os dados retirados em campo serão, posteriormente, analisados e tratados em gabinete, que permitirá uma melhor definição do bloco unitário, a elaboração de cartografias de zonamento geotécnico e zonamento geomecânico e modelação geotécnica.

2.3. Compartimentação dos maciços rochosos: parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos

O comportamento mecânico dos maciços rochosos, a nível de resistência, deformabilidade e permeabilidade está fortemente dependente das características petrofísicas, físicas e geométricas das descontinuidades. A descrição e caracterização das descontinuidades é um passo fulcral num estudo de compartimentação e hidrogeológico de qualquer maciço rochoso (e.g., Hoek, 2007; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Barton & Quadros, 2015). Os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos podem ser avaliados na vertente da matriz rochosa e das descontinuidades (figura 10).

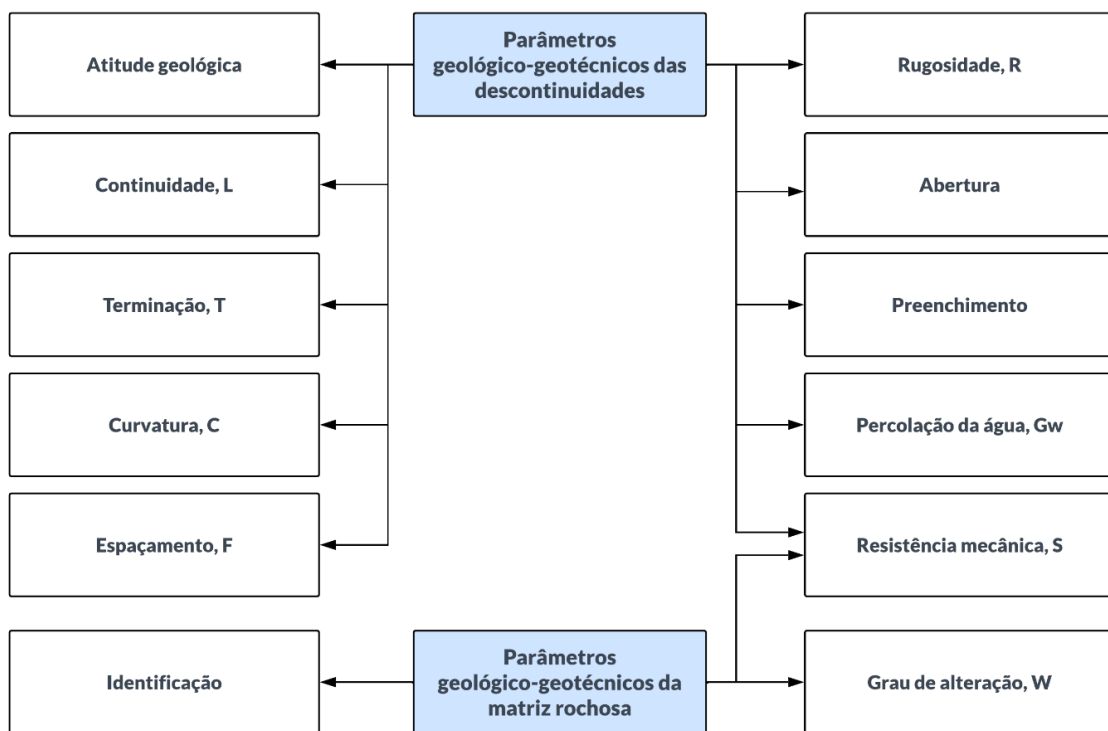








Figura 10 - Parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos das descontinuidades e da matriz rochosa (adaptado de ISRM, 1978, 1981; González de Vallejo & Ferrer, 2011).


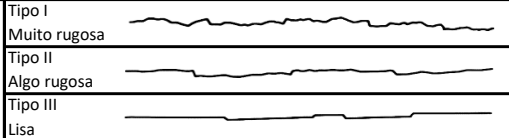

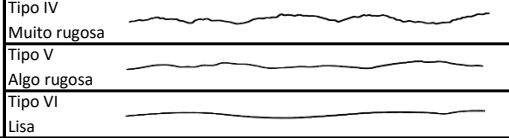

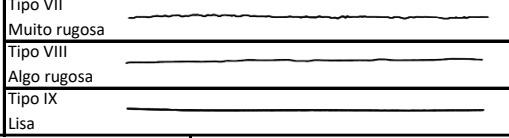

O quadro 3 apresenta uma breve descrição de cada um dos parâmetros referidos na figura 9, uma representação gráfica, os métodos e equipamentos de avaliação e, quando aplicável, uma descrição e classificação proposta pela ISRM (1978, 1981).

(página propositadamente em branco)

Quadro 3 - Parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos da matriz rochosa e das descontinuidades (adaptado de ISRM, 1978, 1981; GSE, 1995; González de Vallejo et al., 2002; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Chaminé et al., 2013, 2015; Chaminé, 2016).

Estudo	Propriedade	Esquema	Descrição	Método de Avaliação	Classificação		
Rocha Intacta	Identificação		A identificação dum rocha é estabelecida através da composição mineralógica, a forma e tamanho dos grãos, cor, transparência e dureza (González de Vallejo et al., 2002).	Observação direta <i>in situ</i> ; Análises em laboratório.			
	Grau de Alteração, <i>W</i> (adaptado de ISRM, 1978, 1981; G.S.E., 1995)		A alteração é definida como a desintegração, decomposição e/ou meteorização de um material geológico (González de Vallejo et al., 2002).	Observação direta <i>in situ</i> .	Grau de Alteração		
			Rocha sã ou não alterada		W ₁	W ₁₋₂	
			Rocha ligeiramente alterada		W ₂		
			Rocha moderadamente alterada		W ₃		
Rocha muito alterada	W ₄	W ₄₋₅					
Rocha completamente alterada a decomposta	W ₅						
Rocha Intacta e Descontinuidades	Resistência Mecânica, <i>S</i> (adaptado de ISRM, 1981)		O comportamento mecânico das rochas está relacionado com a resistência à compressão uniaxial (UCS) das mesmas e a sua deformabilidade. Este parâmetro é estudado num meio não confinado, e depende diretamente da composição da matriz rochosa e do grau de alteração.	A resistência mecânica pode ser obtida <i>in situ</i> , recorrendo ao ensaio esclerométrico utilizando o martelo de <i>Schmidt</i> , ou em laboratório fruindo do ensaio de carga pontual	Resistência à compressão simples		
					Muito elevada (> 200 MPa)	S ₁	S ₁₋₂
					Elevada (60 - 200 MPa)	S ₂	
					Moderada (20 - 60 MPa)	S ₃	
					Baixa (6 - 20 MPa)	S ₄	S ₄₋₅
Muito baixa (< 6 MPa)	S ₅						
Descontinuidades	Atitude geológica (adaptado de ISRM, 1978, 1981)		A atitude geológica é constituída pela direção e inclinação de uma descontinuidade. A direção trata-se do ângulo da linha de gradiente em relação ao norte magnético, variando entre 0° e 360°. Por outro lado, a inclinação, define-se como o ângulo que a linha de maior declive faz com o plano horizontal, e está compreendida entre 0° e 90°.	A atitude geológica é medida <i>in situ</i> com recurso a bússola de geólogo com clinómetro.	Exemplo de Atitude Geológica		
	Continuidade, <i>L</i> e Terminação, <i>T</i> (adaptado ISRM, 1978, 1981)		A continuidade, ou persistência de uma descontinuidade, trata-se da extensão superficial , medida longitudinalmente, segunda a direção do plano.	A continuidade é medida com uma fita métrica, quando possível, uma vez que este parâmetro depende fortemente da terminação da descontinuidade.	Designação		
					Muito contínua	> 20 m	
					Contínua	10 - 20 m	
					Medianamente contínua	3 - 10 m	
					Pouco contínua	1 - 3 m	
					Muito pouco contínua	< 1 m	
					Terminação, T		
	Tipo R	Na rocha					
	Tipo D	Noutra descontinuidade					
	Tipo O	Obscura - Não é possível observar a terminação					
	Curvatura, <i>C</i> (adaptado de ISRM, 1978, 1981)		Define-se como a curvatura natural que a descontinuidade apresenta	Observação direta <i>in situ</i>	Curvatura		
Espaçamento, <i>F</i> (adaptado de ISRM, 1978, 1981)		O espaçamento é definido como o a distância entre os diferentes planos de descontinuidade, o que, aliada às atitudes geológicas das mesmas, condicionará o tamanho dos blocos da matriz rochosa, consequentemente influenciando o comportamento mecânico do maciço rochoso.	O espaçamento é medido através de uma fita métrica graduada, aplicando a "Scanline Sampling Technique" (ISRM , 1981; González de Vallejo & Ferrer , 2011; Chaminé et al., 2013, 2015; Chaminé, 2016)	Distância entre descontinuidades			
				Muito afastadas (> 200 cm)	F ₁	F ₁₋₂	
				Afastadas (60 - 200 cm)	F ₂		
				Medianamente afastadas (20 - 60 cm)	F ₃		
				Próximas (6 - 20 cm)	F ₄	F ₄₋₅	
Muito próximas (< 6 cm)	F ₅						

Quadro 3 – (continuação...)

Descontinuidades	Rugosidade, <i>R</i> (adaptado de ISRM, 1978, 1981; González de Vallejo et al., 2002)		A rugosidade refere-se à ondulação e irregularidades a pequena escala dos planos de descontinuidade. Este parâmetro afeta vigorosamente a resistência ao corte. Quanto mais rugosa for uma superfície, maior será a resistência ao corte e, conseqüentemente, menores as probabilidades de ocorrer rotura.	Observação direta <i>in situ</i> .	Denteada	Tipo I Muito rugosa Tipo II Algo rugosa Tipo III Lisa																
	Abertura (adaptado de ISRM, 1978, 1981)		A abertura é a distância na perpendicular que separa as paredes da descontinuidade quando não existe preenchimento (González de Vallejo et al., 2002).	Medição realizada <i>in situ</i> com recurso a uma régua graduada com precisão milimétrica.	Ondulada	Tipo IV Muito rugosa Tipo V Algo rugosa Tipo VI Lisa																
	Preenchimento (adaptado de ISRM, 1978, 1981)		O preenchimento define-se com o material existente numa descontinuidade, dependente da abertura.	Observação direta <i>in situ</i> .	Plana	Tipo VII Muito rugosa Tipo VIII Algo rugosa Tipo IX Lisa																
	Percolação da água, <i>GW</i> (adaptado de ISRM, 1978, 1981)		A água que se encontra no maciço rochoso é normalmente derivado do fluxo que circula nas suas descontinuidades (permeabilidade secundária)	Observação direta <i>in situ</i> .	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Abertura</th> <th style="width: 50%;">Nomenclatura</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cavernosa (> 1.000 mm)</td> <td rowspan="3">Descontinuidade "muito aberta"</td> </tr> <tr> <td>Extremamente larga (100 - 1.000 mm)</td> </tr> <tr> <td>Muito larga (10 - 100 mm)</td> </tr> <tr> <td>Larga (> 10 mm)</td> <td rowspan="2">Descontinuidade "aberta"</td> </tr> <tr> <td>Razoavelmente larga (2,5 - 10 mm)</td> </tr> <tr> <td>Aberta (0,5 - 2,5 mm)</td> <td rowspan="3">Descontinuidade "fechada"</td> </tr> <tr> <td>Parcialmente aberta (0,25 - 0,5 mm)</td> </tr> <tr> <td>Apertada (0,1 - 0,25 mm)</td> </tr> <tr> <td>Muito apertada (< 0,1 mm)</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Abertura	Nomenclatura	Cavernosa (> 1.000 mm)	Descontinuidade "muito aberta"	Extremamente larga (100 - 1.000 mm)	Muito larga (10 - 100 mm)	Larga (> 10 mm)	Descontinuidade "aberta"	Razoavelmente larga (2,5 - 10 mm)	Aberta (0,5 - 2,5 mm)	Descontinuidade "fechada"	Parcialmente aberta (0,25 - 0,5 mm)	Apertada (0,1 - 0,25 mm)	Muito apertada (< 0,1 mm)	
	Abertura	Nomenclatura																				
	Cavernosa (> 1.000 mm)	Descontinuidade "muito aberta"																				
	Extremamente larga (100 - 1.000 mm)																					
	Muito larga (10 - 100 mm)																					
	Larga (> 10 mm)	Descontinuidade "aberta"																				
	Razoavelmente larga (2,5 - 10 mm)																					
Aberta (0,5 - 2,5 mm)	Descontinuidade "fechada"																					
Parcialmente aberta (0,25 - 0,5 mm)																						
Apertada (0,1 - 0,25 mm)																						
Muito apertada (< 0,1 mm)																						
					<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Classe de percolação da água</th> <th style="width: 50%;">Nomenclatura</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Seco</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>Húmido</td> <td>H</td> </tr> <tr> <td>Gotejante</td> <td>G</td> </tr> <tr> <td>Fluxo</td> <td>F</td> </tr> </tbody> </table>		Classe de percolação da água	Nomenclatura	Seco	S	Húmido	H	Gotejante	G	Fluxo	F						
Classe de percolação da água	Nomenclatura																					
Seco	S																					
Húmido	H																					
Gotejante	G																					
Fluxo	F																					
					Os tipos de preenchimento mais comuns são: quartzo, argila mole, argila dura, rocha esmagada e terra vegetal.																	

2.4. Sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos

“When you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind”

Lord Kelvin (1824 - 1907)

2.4.1. Considerações iniciais

Sistemas de classificação de maciços rochosos têm sido desenvolvidos desde 1879, quando *Ritter* tentou formalizar uma abordagem empírica para um projeto de túneis, com intuito de determinar os seus requisitos de suporte (Hoek, 2007). Mais tarde, Terzaghi, em 1946, propôs uma sistematização puramente descritiva do maciço rochoso para a concepção de sustimento de um túnel, que destaca as principais características dos maciços rochosos que afetam o seu comportamento, tornando-se um ponto de partida para o desenvolvimento de classificações geomecânicas mais robustas (figura 11).

Os índices geotécnicos e as classificações geomecânicas mais usadas para a avaliação geomecânica dos maciços rochosos fraturados para fins de engenharia são: *RQD* (Deere, 1963; Deere et al., 1967), *RMR* (Bieniawski, 1973, 1976, 1979, 1989, Celada & Bieniawski, 2020), *Q-system* (Barton et al., 1974, 1980; Barton, 2006; NGI, 2015), *GSI* (Hoek & Brown, 1997; Hoek et al., 1998; Marinos & Hoek, 2000; Marinos et al., 2005), *SRC* (González de Vallejo, 1983, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011) e *RMi* (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2010, 2014). O quadro 4 apresenta uma síntese dos parâmetros que cada uma destas classificações geomecânicas contabiliza, bem como as conclusões das suas aplicações.

Quadro 4 – Índices geotécnicos e classificações geomecânicas aplicadas com os respectivos parâmetros do maciço rochoso e das descontinuidades a analisar e conclusões do estudo (Deere, 1963; Deere et al., 1967; Bieniawski, 1973, 1976, 1979, 1989; Barton et al., 1980; González de Vallejo, 1983, 2003; Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Hoek & Brown, 1997; Hoek et al., 1998; Marinos & Hoek, 2000; Marinos et al., 2005; Barton, 2006; Palmström & Stille, 2010, 2014; González de Vallejo & Ferrer, 2011; NGI, 2015; Celada & Bieniawski, 2020).

Classificação geomecânica	Parâmetros a analisar	Conclusões
<p>RQD <i>Rock Quality Designation</i> (Deere, 1963; Deere et al., 1967)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Percentagem de rocha intacta, tendo em consideração o espaçamento (F) entre descontinuidades 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade do maciço rochoso
<p>RMR <i>Rock Mass Rating</i> (Bieniawski, 1973, 1976, 1979, 1989, Celada & Bieniawski, 2020)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta; • Qualidade do maciço rochoso (<i>RQD</i>); • Espaçamento entre descontinuidades; • Características físicas e geométricas das descontinuidades (Continuidade, abertura, rugosidade, percolação da água e alteração); • Orientação das descontinuidades em comparação com o sentido da escavação 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade do maciço rochoso; • Módulo de deformabilidade do maciço rochoso; • Coesão do maciço rochoso; • Ângulo de atrito interno do maciço rochoso; • Módulo de deformabilidade; • Período de auto-suporte; • Soluções de sustimento da escavação; • Pressão de suporte máxima
<p>Q-system <i>Rock Tunneling Quality Index</i> (Barton et al., 1974, 1980; Barton, 2006; NGI, 2015)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade do maciço rochoso (<i>RQD</i>); • Número de famílias de descontinuidades; • Características das descontinuidades (Rugosidade, preenchimento, alteração e percolação da água); • Estado de tensão nas proximidades da escavação 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade do maciço rochoso; • Módulo de deformabilidade do maciço rochoso; • Ângulo de atrito interno aproximado do maciço rochoso; • Soluções de sustimento da escavação
<p>GSI <i>Geological Strength Index</i> (Hoek & Brown, 1997; Hoek et al., 1998; Marinos & Hoek, 2000; Marinos et al., 2005)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Compartimentação do maciço rochoso (Forma do bloco, número de descontinuidades e grau de fraturação); • Qualidade do maciço rochoso (<i>RQD</i>); • Características físicas e geométricas das descontinuidades (Continuidade, abertura, rugosidade e alteração) 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade do maciço rochoso; • Módulo de deformabilidade do maciço rochoso
<p>SRC <i>Surface Rock Classification</i> (González de Vallejo, 1983, 2003; Gonzalez de Vallejo & Ferrer, 2011)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta; • Espaçamento médio entre descontinuidades; • Qualidade do maciço rochoso (<i>RQD</i>); • Características das descontinuidades (Rugosidade, continuidade, abertura, preenchimento e alteração); • Percolação da água; • Estado de tensão do maciço rochoso 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade do maciço rochoso; • Módulo de deformabilidade do maciço rochoso; • Coesão do maciço rochoso; • Ângulo de atrito interno do maciço rochoso; • Módulo de deformabilidade; • Período de auto-suporte; • Soluções de sustimento da escavação; • Pressão de suporte máxima
<p>RMI <i>Rock Mass Index</i> (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2010, 2014)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta; • Características das descontinuidades (Rugosidade, continuidade, abertura, preenchimento e alteração); • Volume do bloco 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade do maciço rochoso;

(página propositadamente em branco)

2.4.2. Índices blocométricos

O número de famílias de descontinuidades, a sua orientação, espaçamento e persistência condicionam o tamanho do bloco, que irá afetar o comportamento mecânico do material-rocha e a sua resistência (González de Vallejo & Ferrer, 2011). Os índices blocométricos apresentam uma boa previsão do tamanho do bloco unitário, considerando o número de descontinuidades presente no maciço rochoso (figura 12). Esses índices são:

- *Block Size Index* (I_b), ou índice dimensional, que representa a dimensão média do bloco tomando partido do espaçamento médio, em metros, das famílias de descontinuidades (ISRM, 1981);
- Índice volumétrico (J_v), que permite calcular o número de descontinuidades por m^3 de rocha (Palmström, 1995) e
- Frequência das descontinuidades (λ).

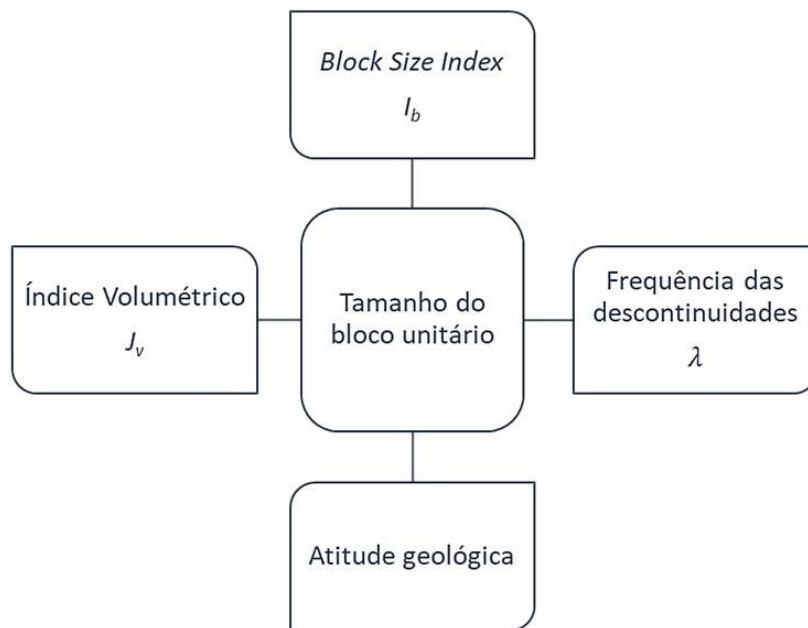


Figura 12 - Parâmetros que influenciam o tamanho do bloco unitário (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Estes índices podem ser obtidos através das fórmulas apresentadas no quadro 5.

Quadro 5 - Equações base para a obtenção dos índices blocométricos - índice volumétrico, *Block Size Index* e frequência de descontinuidades (ISRM, 1978; Palmström, 1995; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Índice	Unidades	Fórmula
J_v Índice volumétrico (Palmström, 1995)	Descontinuidades/m ³	$J_v = \frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} + \dots + \frac{1}{e_n} + \frac{N_R}{S_R}$
I_b <i>Block Size Index</i> (ISRM, 1978)	m	$I_b = \frac{e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_n}{n}$
λ Frequência de descontinuidades (González de Vallejo, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011)	m ⁻¹	$\lambda = \frac{\text{número de descontinuidades}}{\text{comprimento (L)}} \quad \text{OU}$ $\lambda = \frac{1}{\text{espaçamento médio entre descontinuidades}}$

A partir dos índices blocométricos, é possível definir o tamanho dos blocos. O quadro 6 apresenta uma descrição dos blocos através do índice dimensional, I_b (BSI, 2003).

Quadro 6 - Descrição do bloco em termos de tamanho a partir da sua dimensão máxima, ou índice dimensional, I_b (BSI, 2003).

Índice dimensional, I_b (m)	Descrição
> 2	Blocos muito grandes
0,6 - 2	Blocos grandes
0,2 - 0,6	Blocos de tamanho médio
0,06 - 0,2	Blocos pequenos
< 0,06	Blocos muito pequenos

O tamanho dos blocos pode também ser determinado recorrendo ao índice volumétrico, J_v , que fornece o número de descontinuidades por m³ de rocha e o seu volume expectável (quadro 7).

Quadro 7 - Determinação do tamanho do bloco através do índice volumétrico, J_v (ISRM, 1978, 1981; Toyos et al., 1994; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Índice volumétrico, J_v (descontinuidades/m ³)	Volume expectável (m ³)	Descrição
< 1	> 25	Blocos muito grandes
1 - 3	1 - 25	Blocos grandes
3 - 10	0,025 - 1	Blocos de tamanho médio
10 - 30	0,001 - 0,025	Blocos pequenos
30 - 60	< 0,001	Blocos muito pequenos
> 60		Rocha esmagada

Com base no tamanho do bloco e a sua forma, a maciço rochoso é classificável em classes, as quais se encontram no quadro 8, com a respetiva descrição.

Quadro 8 - Classificação do maciço rochoso quanto ao tamanho dos blocos e na sua forma (ISRM, 1978).

Classe	Tipo	Descrição
I	Maciço	Poucas descontinuidades e muito espaçadas
II	Em bloco	Blocos aproximadamente equidimensionais
III	Tabular	Blocos com uma dimensão consideravelmente inferior às restantes duas
IV	Colunar	Blocos com uma dimensão consideravelmente superior às restantes duas
V	Irregular	Grande variação na forma do bloco e suas dimensões
VI	Esmagada	Grande quantidade de descontinuidades

A forma do bloco também pode ser determinada de acordo com a sugestão de Palmström (1995), como demonstrado na figura 13.

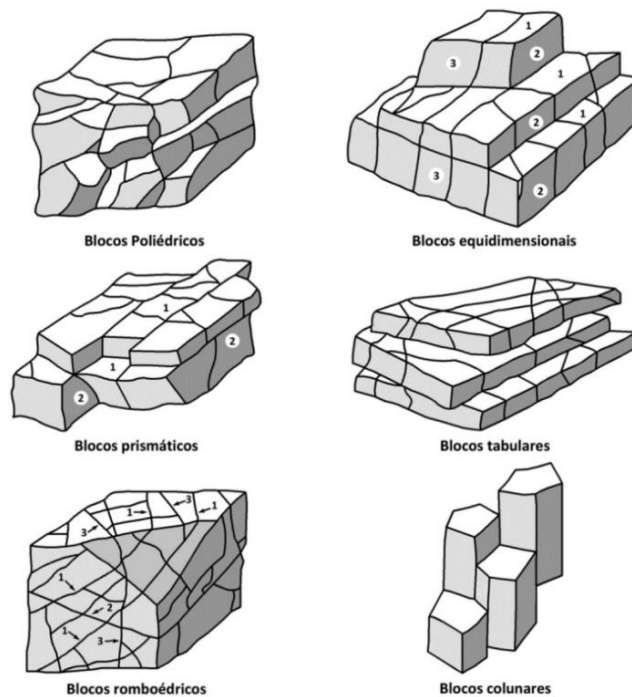


Figura 13 - Formas do bloco resultantes do padrão de fraturação do maciço rochoso com três famílias de descontinuidades (adaptado de Dearman, 1991). Segundo: Palmström (1995).

Finalmente, Palmström, em 1995, sugeriu um cálculo expedito para a determinação do volume do bloco (V_b), tomando partido das três principais famílias de descontinuidades. Essa expressão encontra-se na equação 1.

Equação 1 - Expressão volumétrica da densidade de descontinuidades (adaptado de Palmström, 1995).

$$V_b = \frac{e_1 \times e_2 \times e_3}{\sin \gamma_1 \times \sin \gamma_2 \times \sin \gamma_3}$$

Onde e_n representa o espaçamento médio entre (três) descontinuidades e γ expressa o ângulo entre as diferentes famílias de descontinuidades (figura 14).

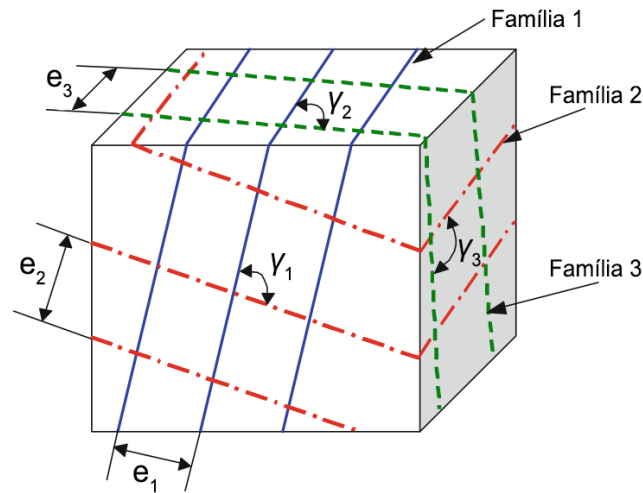


Figura 14 - Volume do bloco delimitado pelas famílias de descontinuidades (adaptado de Kim et al., 2007).

Esta equação será útil para a posterior aplicação do *Geological Strength Index*, *GSI* (Hoek & Brown, 1997; Hoek et al., 1998, 2013) e do *Rock Mass Index*, *RMI* (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2010, 2014).

2.4.3. Índice de fraturação do granito (*GFI*)

O *Granite Fracturing Index* (*GFI*) é um interessante índice que se baseia no índice volumétrico, no número de famílias de descontinuidades e no seu espaçamento médio (Sousa, 2007), desenvolvido para determinar o melhor local para a exploração de rocha ornamental (em rochas granitóides) a partir das características mencionadas. Este índice pode ser obtido através da equação 2.

Equação 2 - Expressão para o cálculo do índice *GFI* (Sousa, 2007).

$$GFI = 0,5 \times \left(1 - \frac{J_V}{\bar{J}_V}\right) + 0,2 \times \left(1 - \frac{J_n}{\bar{J}_n}\right) + 0,3 \times \left(\frac{J_S}{\bar{J}_S}\right)$$

Onde J_v representa o índice volumétrico por zona geotécnica e \bar{J}_V o seu valor médio; J_n o número de famílias de descontinuidades em cada zona geotécnica e \bar{J}_n a sua média; J_s representa o espaçamento médio por ZG e \bar{J}_s a sua média geral.

O J_s , ou *average joint spacing*, é dado pela expressão descrita na equação 3.

Equação 3 - Fórmula para obtenção do espaçamento médio (Sousa, 2007).

$$J_s = \frac{\sum e_n}{N}$$

Onde e_n representa o somatório do espaçamento médio de cada zona geotécnica e N é o número total de descontinuidades. O índice J_v representa o número de descontinuidades por m^3 de rocha, mencionado no quadro 7.

Acompanhando os índices anteriormente referidos, é recomendado calcular o valor médio de continuidade de uma descontinuidade (J_l) e o índice de terminação (J_p). O parâmetro J_l é dado pela equação 4.

Equação 4 - Expressão de cálculo do valor médio da persistência (Sousa, 2007).

$$J_l = \frac{\sum L_n}{N}$$

Onde L_n representa o valor médio da persistência em cada zona geotécnica e N o número total de descontinuidades. Finalmente, o parâmetro J_p , que define a percentagem de descontinuidades que terminam no material-rocha, é dado pela equação 5.

Equação 5 - Expressão para o cálculo do índice J_p (Sousa, 2007).

$$J_p = \frac{N_r}{2 \times N}$$

Onde N_r é o número de descontinuidades que terminam no material-rocha e N o número total de descontinuidades.

O índice GFI (Sousa, 2007) foi desenvolvido com perspectiva a maciços rochosos graníticos pouco fraturados e permite definir se um determinado local é apto para a exploração de rocha ornamental. O seu valor tende a aproximar-se de 0, que reflete um maciço de qualidade média; contudo, quanto mais reduzido for, de mais fraca qualidade é o maciço rochoso, e quanto maior for o resultado, mais competente o maciço o será. Em correlação com densidade de descontinuidades (J_v), Orce García (1996) sugere uma indicação do tamanho do bloco a partir deste parâmetro com uma perspectiva comercial e geoeconómica (quadro 9).

Quadro 9 - Indicação do tamanho do bloco para fins de rocha ornamental de acordo com a densidade de descontinuidades (Orce García, 1996).

J_v (descontinuidades/ m^3)	Indicação do tamanho do bloco	Observações
< 1,7	Grande	Bloco comercializável
1,7	Ótimo	
2,2	Aceitável	Bloco não comercializável
> 2,2	Inaceitável	

2.4.4. Rock Quality Designation, RQD

O índice de qualidade de rocha, ou *Rock Quality Designation (RQD)*, foi introduzido por Don Deere em 1963, num artigo denominado “*Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes*”, que permite quantificar a percentagem de material-rocha recuperado num furo de sondagem (Deere et al., 1967; Deere & Deere, 1988). Todavia, recentemente surgiram críticas à pertinência na sua utilização nos dias de hoje (pormenores em Pells et al., 2017). Desde então, o índice tem sido alvo de aperfeiçoamento e de novas aproximações a partir dos índices blocométricos (Palmström, 1995, 2005; Priest, 1993). Priest e Hudson, em 1976, sugeriram um ábaco para a determinação do $TRQD_t$, um valor de “RQD teórico”, determinado através do espaçamento médio entre descontinuidades e uma curva “ t ”, de *threshold* (ou seja, limiar), que depende dos intervalos de confiança, isto é, da representatividade dos valores de espaçamento obtidos (Priest, 1993).

- $TRQD_1$ – Intervalo de confiança de 16% $\geq 1,0$ m, ou seja, os valores de espaçamento obtidos não são estatisticamente significativos. Trata-se da aproximação de $TRQD$ mais conservadora e segura.
- $TRQD_{0,1}$ – Intervalo de confiança de 95% $\geq 0,1$ m. O valor de espaçamento médio é calculado através de inúmeros dados estatisticamente representativos. A expressão da curva é dada pela equação 6 (Priest, 1993).

Equação 6 - Determinação de $TRQD$ para $t = 0,1$ (Priest, 1993).

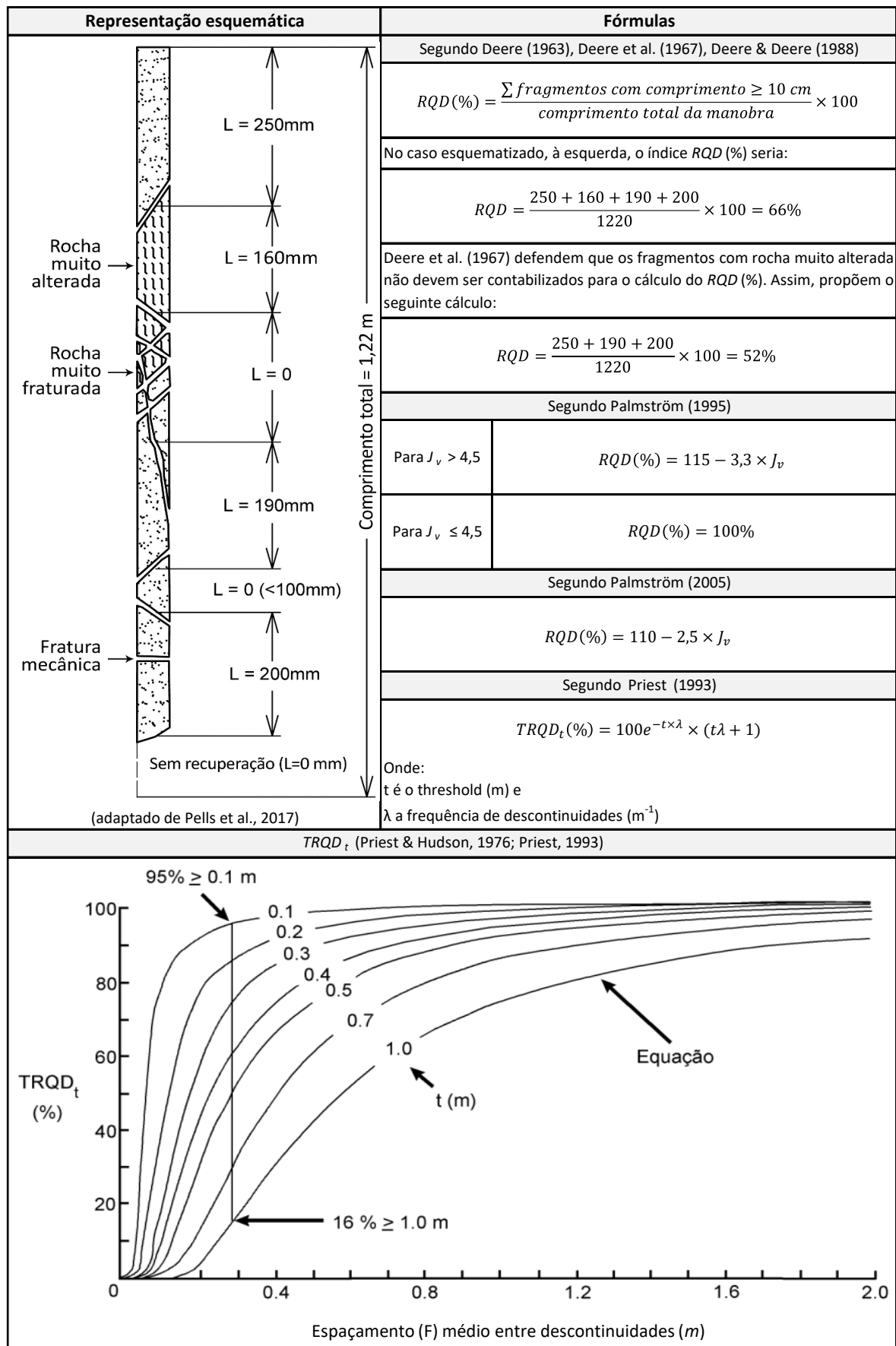
$$TRQD_{0,1} \approx 110,4 - 3,68e$$

Onde:

- e – representa o espaçamento médio entre descontinuidades.

O quadro 10 apresenta algumas abordagens ao índice RQD , de diversos autores, e é apresentada uma fórmula geral para o cálculo do $TRQD_t$.

Quadro 10 - Métodos de aquisição do índice RQD e $TRQD_t$ (e.g., Deere, 1963; Deere et al., 1967; Priest & Hudson, 1976; Priest, 1993; Palmström, 1995, 2005; Pells et al., 2017).



Com a obtenção do *RQD*, é possível classificar a rocha quanto à sua qualidade. As suas descrições, em correspondência com o parâmetro de qualidade, encontram-se descritos no quadro 11.

Quadro 11 - Classificação do maciço rochoso a nível de qualidade correlacionando com índice *RQD* (adaptado de Deere et al., 1967).

Índice de qualidade da rocha, <i>RQD</i>	Classificação
< 25%	Muito fraca
25 - 50%	Fraca
50 - 75%	Razoável
75 - 90%	Boa
> 90%	Muito boa

Embora a sugestão de Deere et al. (1967), seja recomendada a *logs* de sondagem, a sua aplicação no caso de estudo é pertinente, uma vez que o método da *scanline* é, em termos práticos, uma “sondagem linear”.

2.4.5. Rock Mass Rating, *RMR*₈₉

O sistema de classificação *Rock Mass Rating* (*RMR*) foi introduzido pelo engenheiro Zdzisław Bieniawski, em 1973 e é aplicada em maciços rochosos. O seu estudo foca-se na atribuição de um peso a parâmetros físicos, geométricos e mecânicos do maciço (e.g., Bieniawski, 1973, 1976, 1979, 1989, 1993; Celada et al., 2014; Celada & Bieniawski, 2020). Na figura 15 estão representados estes parâmetros com os possíveis intervalos de peso.

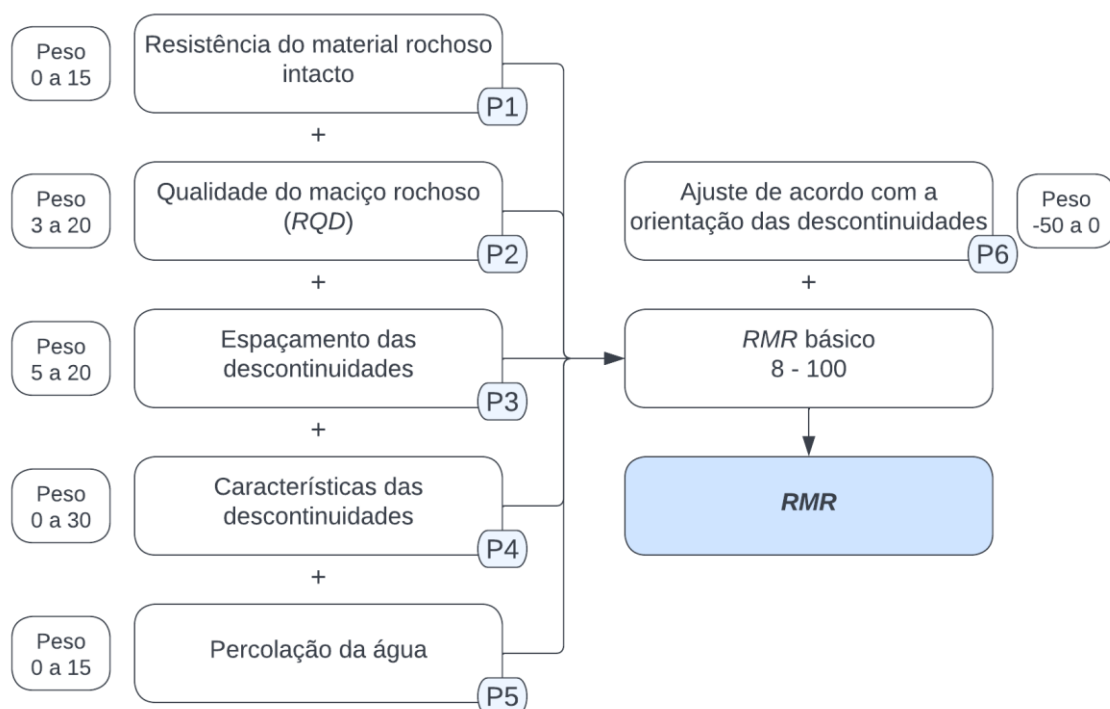


Figura 15 - Diferentes parâmetros contabilizados para a obtenção do *Rock Mass Rating* (adaptado de Bieniawski, 1973, 1989).

A sua aplicação baseia-se na soma dos cinco primeiros parâmetros, referentes à resistência do material rochoso intacto, à qualidade do maciço rochoso, tomando partido do *RQD* (Deere et al., 1967; Priest, 1993; Palmström, 1995), o espaçamento médio entre descontinuidades e as suas características, a nível de continuidade, abertura, rugosidade, preenchimento e grau de alteração (ISRM, 1978, 1981) e à percolação da água (Bieniawski, 1973, 1989; Serafim & Pereira, 1983; Celada & Bieniawski, 2020). Com a obtenção do $RMR_{Básico}$, é necessário o seu ajuste, que depende da finalidade do maciço rochoso (túneis e minas, fundações ou taludes) e do efeito da direção e da inclinação das descontinuidades segundo a geometria e o sentido da escavação (Bieniawski, 1973, 1989, 1993; Celada & Bieniawski, 2020).

O quadro 12 representa detalhadamente os diferentes parâmetros para a determinação do índice $RMR/_{89}$, bem como a classificação da rocha quanto à sua qualidade, uma estimativa do tempo médio de auto-sustimento, a coesão e o ângulo de atrito do maciço rochoso e também uma sugestão de sustimento do túnel.

Em 2014, Celada et al., sugeriram uma correção do índice $RMR/_{89}$. Esta atualização consistiu na substituição dos parâmetros '*RQD*' e 'espaçamento entre descontinuidades' por 'número de descontinuidades por metro', a inclusão da resistência das descontinuidades e a alterabilidade pelo efeito de água (I_{dz}). Uma vez que o equipamento para a avaliação da alterabilidade, o *Slake Durability Test*, é dispendioso, este ensaio não será aplicado e, conseqüentemente, não será aplicada a modificação proposta por Celada et al. (2014). Contudo, os mesmos autores propuseram um cálculo empírico deste índice, dado pela equação 7, com um nível significativo de robustez estatística (pormenores em Celada & Bieniawski, 2020).

Equação 7 - Correção do índice $RMR/_{89}$ (Celada et al., 2014; Celada & Bieniawski, 2020).

$$RMR_{14} = 1,1 \times RMR_{89} + 2$$

(página propositadamente em branco)

Quadro 12 - Parâmetros para a avaliação do *Rock Mass Rating (RMR₈₉)* e consequente ajuste derivado da orientação das descontinuidades, avaliação da qualidade, coesão e ângulo de atrito do maciço rochoso, tempo médio de autossustentação e proposta de sustimento (adaptado de Bieniawski, 1973, 1989, 1993; Waltham, 2002; Celada et al., 2014; Celada & Bieniawski, 2020).

Parâmetros de classificação e seus pesos									
Parâmetro			Intervalo de variação dos valores						
P1	Resistência do material rochoso intacto	Point-Load (MPa)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Para esta gama baixa de valores, é preferível/aconselhável o recurso ao ensaio de compressão uniaxial.		
		Resistência à compressão uniaxial (MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	10 - 25	2 - 10	1 - 2
		Descrição	Excepcionalmente resistente	Muito resistente	Medianamente resistente	Resistente	Pouco resistente	Muito pouco resistente	Muitíssimo pouco resistente
		Peso	15	12	7	4	2	1	0
P2	Índice de qualidade da rocha, RQD (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
	Peso		20	17	13	8	3		
P3	Espaçamento médio entre descontinuidades (m)		> 2,0	0,6 - 2,0	0,2 - 0,6	0,06 - 0,2	< 0,06		
	Peso		20	15	10	8	5		
P4	Continuidade, L (m)		< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20		
	Peso		6	4	2	1	0		
	Abertura (mm)		0,0	< 0,1	0,1 - 1,0	1,0 - 5,0	> 5,0		
	Peso		6	5	4	1	0		
	Rugosidade, R		Muito rugosa	Rugosa	Ligeiramente rugosa	Macia	Lisa		
	Peso		6	5	3	1	0		
	Preenchimento		Nenhum	Preenchimento duro (< 5,0 mm)	Preenchimento duro (> 5,0 mm)	Preenchimento mole (< 5,0 mm)	Preenchimento mole (> 5,0 mm)		
	Peso		6	4	2	2	0		
P5	Alteração, W		Sã ou não alterada, W ₁	Ligeiramente alterada, W ₂	Moderadamente alterada, W ₃	Muito alterada, W ₄	Decomposta, W ₅		
	Peso		6	5	3	1	0		
P5	Percolação da água, GW	Caudal por 10 metros de túnel (l/m)	0	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		Pressão da água nas diáclases/ tensão principal máxima	0,0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Descrição	Completamente seca	Ligeiramente húmida	Húmida	Gotejante	Fluxo		
		Peso	15	10	7	4	0		
$P1 + P2 + P3 + P4 + P5 = RMR_{Básico}$									
Ajuste dos pesos devido à orientação das descontinuidades									
		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável			
	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12			
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25			
	Taludes	0	-5	-25	-50	-			
Efeito da orientação da direção e da inclinação das descontinuidades em túneis									
P6	Orientação	Condição						Resultado	
	Direção perpendicular ao eixo do túnel	Escavar a favor do mergulho, com uma inclinação de 45 a 90°						Muito favorável	
		Escavar a favor do mergulho, com uma inclinação de 20 a 45°						Favorável	
		Escavar contra o mergulho, com uma inclinação de 45 a 90°						Razoável	
		Escavar contra o mergulho, com uma inclinação de 25 a 45°						Desfavorável	
	Direção paralela ao eixo do túnel	Inclinação entre 45 e 90°						Muito favorável	
		Inclinação entre 20 e 45°						Razoável	
Inclinação entre 0 e 20°, independente da direção						Razoável			
$RMR_{89} = RMR_{Básico} + P6$									

Quadro 12 – (continuação...)

Classe do maciço rochoso determinado através da soma dos pesos parciais						
Peso	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21	
Classe	I	II	III	IV	V	
Descrição	Rocha muito boa	Rocha boa	Rocha razoável	Rocha má	Rocha muito má	
Características da rocha com base na sua classe						
Classe	I	II	III	IV	V	
Tempo médio de autossustentação	20 anos para um vão de 15 metros	1 ano para um vão de 10 metros	1 semana para um vão de 5 metros	10 horas para um vão de 2,5 metros	30 minutos para um vão de 1 metro	
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	
Carga admissível (T/m ²)	600 - 440	440 - 280	280 - 135	135 - 45	45 - 30	
Ângulo seguro de corte do talude (°) (Waltham, 2002)	> 70	65	55	45	< 40	
Sugestão de sustimento do túnel						
Classe	I	II	III	IV	V	
Escavação	Seção total, 3 m de avanço.	Seção total, 1,0 a 1,5 m de avanço. Suporte completo a 20 m da frente.	Seção parcial (frente e baixo), avanço 1,5 a 3,0 m. Início do suporte após cada desmonte. Suporte completo a 10 m.	Seção parcial (frente e baixo), avanço 1,0 a 1,5 m. Instalação do suporte concomitantemente com a escavação.	Seções múltiplas, avanço de 0,5 a 1,5 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 qualquer tipo de suporte, com exceção de pregagens ocasionais	Pregagens de 3 m de comprimento, espaçadas 2,5 m, ocasionalmente com malha de aço em certas 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 a 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 de 1,0 a 1,5 m com malha de aço no teto e hasteais. Pregagem na soleira.
	Betão projetado		50 mm no teto, quando necessário.	50 a 100 mm no teto; 30 mm nos hasteais.	100 a 150 mm no teto; 100 mm nos hasteais.	150 a 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 da soleira.

2.4.6. Rock Tunneling Quality Index, Q-system

O *Rock Tunneling Quality Index (Q-system)* foi introduzido em 1974 por Barton et al., com apoio do Instituto Norueguês de Geotecnia (NGI), e foi alvo de atualizações que introduziram novas e aprimoradas tecnologias de suporte de túneis. O *Q-system* foi desenvolvido com a finalidade de classificar os maciços rochosos, em termos geotécnicos e geomecânicos, em torno de uma abertura subterrânea, permitindo também a sua cartografia geotécnica. Este índice, utilizado correntemente a nível internacional, é determinado com base em seis parâmetros do maciço rochoso, como referido na figura 16 (Barton et al., 1974, 1980; Barton, 2006; NGI, 2015).

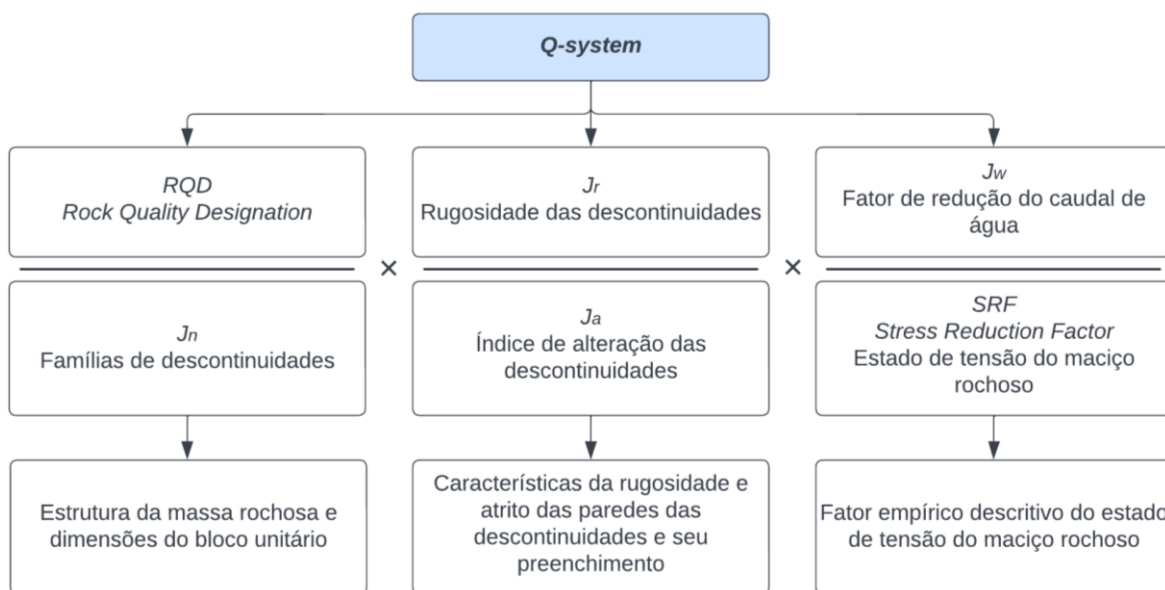


Figura 16 - Parâmetros contabilizados para a determinação do índice *Q-system* (Barton et al., 1974, 1980; NGI, 2015).

A aplicação do *Rock Tunneling Quality Index* é recomendada em túneis e cavernas com teto em forma de abóbada (Singh & Goel, 1999, 2011). A equação 8 representa o cálculo do índice *Q-system*, tomando partido dos parâmetros supramencionados.

Equação 8 - Cálculo do índice *Q-system* a partir dos parâmetros referentes à estrutura da massa rochosa e dimensões do bloco unitário, características das descontinuidades e fator empírico do estado de tensão do maciço rochoso (Barton et al., 1974, 1980; Barton, 2006; NGI, 2015).

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

O resultado (*Q-value*) pode variar numericamente, numa escala logarítmica, entre 0,001, representativo de um maciço de muita fraca qualidade, e 1 000, que reflete maciços de excelente qualidade. O quadro 13 apresenta os três primeiros parâmetros, o índice de qualidade de rocha, *RQD* (Deere et al., 1967), a quantidade de famílias de descontinuidades, *J_n*, e a descrição da rugosidade das descontinuidades, *J_r*.

Quadro 13 - Índice de qualidade de rocha (RQD), número de famílias de descontinuidades (J_n) e índice de rugosidade das descontinuidades (J_r) (adaptado de Barton et al., 1974, 1980).

Qualidade da rocha (Deere et al., 1967)	RQD (%)	Notas
A. Muito fraca	0 - 25	i) Quando $RQD \leq 10\%$ (incluindo 0%), o valor a adotar é 10%. ii) A adoção de valores com intervalos de 5% é suficientemente adequada.
B. Fraca	25 - 50	
C. Razoável	50 - 75	
D. Boa	75 - 90	
E. Excelente	90 - 100	
Número de famílias de descontinuidades	J_n	Notas
A. Nenhuma ou poucas descontinuidades	0,5 - 1,0	i) Para interseções, utilizar $3 \times J_n$
B. Uma família	2	
C. Uma família e uma aleatória	3	
D. Duas famílias	4	
E. Duas famílias e uma aleatória	6	
F. Três famílias	9	ii) Para as bocas de entrada dos túneis utilizar $2 \times J_n$
G. Três famílias e uma aleatória	12	
H. Quatro ou mais famílias, descontinuidades aleatórias, maciços altamente fraturados	15	
I. Rocha esmagada, tipo solo	20	
Índice de rugosidade das descontinuidades	J_r	Notas
a. Contacto das superfícies das descontinuidades		
b. Contacto das superfícies das descontinuidades, com 10 cm de cisalhamento		
A. Descontinuidades descontinuas	4	i) As descrições referentes às alíneas a. e b. referem-se a escalas de amostragem de dimensões pequena e média; ii) Somar 1,0 se o espaçamento da família principal for maior que 3 m; iii) $J_r = 0,5$ pode ser utilizado para descontinuidades estriadas contendo lineações, se estas estão orientadas de acordo com menor resistência; iv) Os valores de J_r e J_n devem ser obtidos aplicando-se à família de descontinuidades que for mais desfavorável para a estabilidade do ponto de vista da orientação e da resistência ao corte
B. Rugosas e irregulares, onduladas	3	
C. Lisas onduladas	2	
D. Estriadas onduladas	1,5	
E. Rugosas ou irregulares, planas	1,5	
F. Lisas planas	1	
G. Estriadas, planas	0,5	
c. Sem contacto das superfícies das descontinuidades quando cisalhadas		
H. Zonas contendo minerais argilosos com espessura suficiente para impedir o contacto entre as paredes	1	-
I. Zonas esmagadas, arenosas ou cascalhentas com espessura suficiente para impedir o contacto entre as paredes	1	-

O quadro 14 apresenta o peso do índice de alteração das descontinuidades, J_a , em paralelo com o ângulo de atrito interno, ϕ_r , e o fator de redução do caudal, J_w , com a respetiva aproximação da pressão de água.

Quadro 14 - Índice de alteração das descontinuidades (J_a) com o respetivo ângulo de atrito interno (Φ_r) e fator de redução do caudal (J_w) (adaptado de Barton et al., 1974, 1980).

Índice de alteração das descontinuidades	J_a	Φ_r (°)	Notas
a. Contacto das superfícies de descontinuidades			
A. Paredes duras e compactas, enchimento impermeável.	0,75	-	i) Os valores Φ_r (°), ângulo de atrito residual, são entendidos como uma aproximação às propriedades mineralógicas dos produtos de alteração, se existentes.
B. Paredes não alteradas, somente com descolocação superficial.	1	25 - 35	
C. Paredes ligeiramente alteradas, películas minerais não brandas, partículas arenosas, etc.	2	25 - 30	
D. Películas silto-arenosas ou silto-argilosas, pequena fração argilosa (não branda).	3	20 - 25	
E. Películas argilosas moles ou de baixo ângulo de atrito, tais como caulinite, mica, gesso, talco, clorite, grafite, etc. e pequenas quantidades de argilas expansivas.	4	8 - 16	
b. Contacto das superfícies das descontinuidades, com (10 cm) de cisalhamento			
F. Partículas arenosas, sem argila, rocha desintegrada, etc.	4	25 - 30	-
G. Preenchimentos argilosos não brandos, sobreconsolidados (contínuo, espessura < 5 mm).	6	16 - 24	
H. Preenchimentos argilosos sobreconsolidados (contínuos, espessura < 5 mm).	8	12 - 16	
J. Preenchimentos argilosos expansivos, i.e., montmorilonite (contínuo, espessura < 5 mm).	8,0 - 12,0	6 - 12	
c. Sem contacto das superfícies das descontinuidades quando cisalhadas			
Fator de redução do caudal	J_w	Pressão de água aproximada (kgf/cm ²)	Notas
A. Escavações secas ou caudal muito baixo, i.e. localmente < 5 L/min	1	< 0,1	i) Os fatores nos casos C a F são estimados para condições naturais: aumentar J_w se forem efetuadas drenagens. ii) Problemas especiais originados pela formação de gelo não são considerados.
B. Caudal ou pressão médios que ocasionalmente arrastam o enchimento das descontinuidades	0,66	0,1 - 0,25	
C. Caudal elevado ou pressão elevada em rochas competentes com descontinuidades sem preenchimento	0,5	0,25 - 1,0	
D. Caudal elevado ou pressão elevada	0,33	0,25 - 1,0	
E. Caudal excepcionalmente elevado ou pressão explosiva, decaindo com o tempo	0,2 - 0,1	> 1,0	
F. Caudal ou pressão excepcionalmente elevados	0,1 - 0,05	> 1,0	

Finalmente, o quadro 15 apresenta uma estimativa do fator *SRF* (*Stress Reduction Factor*), que pode ser calculado através da relação entre a resistência à compressão uniaxial da rocha (σ_c) e a tensão principal (σ_1) ou a resistência de carga pontual (σ_t) (NGI, 2015).

Quadro 15 - Determinação do estado de tensão do maciço, *SRF* (adaptado de Barton et al., 1974, 1980).

Estado de tensão do maciço			<i>SRF</i>	Notas
a. Zonas de fraqueza intersetando a escavação, podendo causar perdas no maciço rochoso quando o túnel for escavado				
A. Ocorrências múltiplas de zonas de baixa resistência, contendo argilas ou rocha quimicamente desintegrada em torno da cavidade (a qualquer profundidade)			10	i) Para a situação A. reduzir os valores de <i>SRF</i> de 25 - 50%, apenas se as zonas de cisalhamento relevantes não intersetarem a escavação.
G. Descontinuidades abertas, fraturação muito intensa (a qualquer profundidade)			5	
Estado de tensão do maciço	σ_c/σ_t	σ_t/σ_c	<i>SRF</i>	Notas
b. Rocha competente, problemas de tensão na rocha				
H. Tensões baixas, próximo da superfície	> 200	> 13	2,5	ii) Para campos de tensões virgens fortemente anisotrópicas (se medidas): quando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, reduzir σ_c para $0,8\sigma_c$. Quando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, reduzir σ_c e σ_t para $0,6\sigma_c$ e $0,6\sigma_t$ onde σ_c = resistência à compressão não confinada, σ_t = resistência de carga pontual (σ_1 e σ_3 são a tensão principal máxima e mínima, respetivamente);
J. Tensões médias	200 - 10	13 - 0,66	1	
K. Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade, pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	10 - 5	0,66 - 0,33	0,5 - 2	
L. Explosões moderadas de rochas maciças	5 - 2,5	0,33 - 0,16	5 - 10	iii) Sugere-se aumentar <i>SRF</i> de 2,5 a 5 para os casos em que a profundidade do coroamento é inferior à largura do vão (ver H.)
M. Explosões intensas de rochas maciças	< 2,5	< 0,16	10 - 20	
Estado de Tensão do maciço			<i>SRF</i>	Notas
c. Rocha esmagada, fluxo plástico de rocha incompetente sob influência de elevada pressão rochosa				
N. Pressão moderada de esmagamento			5 - 10	-
O. Pressão elevada de esmagamento			10 - 20	
d. Rochas expansivas, atividade química expansiva devida à presença de água				
P. Pressão de expansão moderada			5 - 10	-
Q. Pressão de expansão elevada			10 - 15	

Para além do índice *Q-system*, existem dois outros fatores decisivos para o solucionamento do sustimento de túneis e cavernas. Estes fatores referem-se aos requerimentos de segurança (*ESR*) e as dimensões da escavação, *i.e.*, vão livre, diâmetro, ou altura da cavidade (NGI, 2015)

O *ESR*, ou *Excavation Support Ratio*, depende do propósito da escavação, visto que obras de grande importância exigem maiores cuidados em termos de estabilidade e segurança. Um valor de *ESR* mais baixo indica que é necessário um nível superior de segurança, por outro lado, valores de *ESR* mais elevados permitem um nível de segurança inferior (NGI, 2015) As diferentes finalidades da escavação, com o respetivo fator de segurança (*ESR*), e a sua classe encontram-se descritas no quadro 16.

É recomendado adotar $ESR = 1,0$ quando $Q\text{-value} \leq 0,1$ para os tipos de escavação B, C e D, uma vez que valores de *Q* tão reduzidos podem causar graves problemas de estabilidade, com risco de colapso (NGI, 2015).

Quadro 16 - Diferentes finalidades da escavação com a respetiva classe e fator de segurança, *ESR* (adaptado de Barton et al., 1980; Hoek, 2007; NGI, 2015).

Classe	Tipo de escavação	<i>ESR</i>
A	Cavidades mineiras temporárias	2,0 - 5,0
B	Cavidades mineiras definitivas, túneis de aproveitamentos hidráulicos, túneis piloto, túneis de desvio, escavações superiores de grandes cavidades.	1,6 - 2,0
C	Cavernas de armazenamento, estações de tratamento de águas, pequenos túneis rodoferroviários, túneis de acesso	1,2 - 1,3
D	Centrais elétricas, túneis rodoferroviários de grande dimensão, abrigos de defesa, bocas de entrada, intersecções.	0,9 - 1,1
E	Centrais nucleares subterrâneas, estações de caminhos-de-ferro, equipamentos de desporto ou públicos, fábricas, túneis para oleodutos de grandes dimensões	0,5 - 1,8

As características dimensionais da escavação em relação com o *Excavation Support Ratio*, permitirão calcular a dimensão equivalente (D_e), que é um dado fulcral para dimensionar as estruturas de suporte. Esse parâmetro é calculado através da equação 9.

Equação 9 - Expressão de cálculo da dimensão equivalente (Barton et al., 1974; NGI, 2015).

$$D_e = \frac{\text{Vão livre, diâmetro ou altura do túnel (m)}}{ESR}$$

Dependendo ainda do fator de segurança (*ESR*) é o vão livre máximo de um maciço autoportante (L'). A expressão para o cálculo deste parâmetro, proposto por Barton et al. (1974), encontra-se na equação 10.

Equação 10 - Expressão de cálculo do vão livre máximo de um maciço autoportante (Barton et al., 1974).

$$L' = 2 \times ESR \times Q^{0,4}$$

Barton et al. (1974) sugeriram ainda uma estimativa do comprimento das pregagens e ancoragens, quando aplicáveis ou no teto ou hasteais, cujas expressões se encontram no quadro 17.

Quadro 17 - Cálculo do comprimento das pregagens e ancoragens em meio subterrâneo (adaptado de Barton et al., 1974, 1980).

	Teto	Hasteais
Comprimento das Pregagens, L_B (m)	$L_B = 2 + \frac{0,15 \times B}{ESR}$	$L_B = 2 + \frac{0,15 \times H}{ESR}$
Comprimento das Ancoragens, L_A (m)	$L_A = \frac{0,40 \times B}{ESR}$	$L_A = \frac{0,35 \times B}{ESR}$

H - Altura da escavação (m)
B - Largura da escavação (m)

De acordo com o espaçamento entre pregagens (a), determinado através de *Q-value* no ábaco da figura 17, é possível determinar a capacidade de carga da estrutura (P), assumindo uma carga de 10 ton para uma pregagem com 20 mm de diâmetro (equação 11).

Equação 11 - Expressão para a determinação da capacidade de carga da estrutura de sustimento, P (Barton et al., 1974).

$$P = \frac{1}{a^2}$$

2.4.7. Correlação Rock Mass Rating ($RMR/89$) e Q -system

As classificações RMR e Q -system foram lançadas e desenvolvidas em 1973 e 1974, respetivamente, com o intuito de classificar maciços rochosos com base nos seus parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos (Barton & Bieniawski, 2008). Adaptados para projetos de escavações subterrâneas, estes índices podem ser aplicados em maciços rochosos de boa e má qualidade que, em colaboração com ensaios geofísicos, poderão fornecer informações cruciais para a modelação geomecânica e zonamento geotécnico (Barton, 2006).

2.4.7.1. Correlações empíricas

Ao longo dos anos, com base em diferentes casos reais, foram desenvolvidas diversas equações que correlacionam as classificações RMR e Q -system, uma vez que ambas as aproximações se baseiam em propriedades muito semelhantes. Desta forma, foi concluído que havia uma relação entre as duas classificações, permitindo prever o resultado de RMR a partir de Q -system, ou vice-versa (Laderian & Abaspoor, 2012). Rutledge & Preston (1978) sugeriram que as relações entre estes dois índices deveriam obedecer ao formato representado na equação 12.

Equação 12 - Formato base das correlações entre $RMR/89$ e Q -system (Rutledge & Preston, 1978).

$$RMR = A \times \ln Q + B$$

Onde A varia entre 5 e 15, e B varia entre 35 e 60 (Zhang et al., 2004). As correlações entre RMR e Q -system mais recorridas para classificação de maciços rochosos encontram-se resumidas no quadro 18.

Quadro 18 - Sumário das diferentes correlações entre *RMR* e *Q-system* (Rutledge & Preston, 1978; Moreno Tallon, 1980; Cameron-Clarke & Budavari, 1981; Abad et al., 1984; Bieniawski, 1984; Barton, 1995; Singh & Goel, 1999).

Correlação		Coefficiente de determinação (R^2)	Autor(es)
$RMR = 5,9 \ln Q + 43$	$Q \approx e^{\frac{RMR-43}{5,9}}$	0,81	Rutledge & Preston (1978)
$RMR = 5,4 \ln Q + 55,2$	$Q \approx e^{\frac{RMR-55,2}{5,4}}$	0,55	Moreno Tallon (1980)
$RMR = 5 \ln Q + 60,8$	$Q \approx e^{\frac{RMR-60,8}{5}}$	Dados muito dispersos	Cameron-Clarke & Budavari (1981)
$RMR = 10,5 \ln Q + 41,8$	$Q \approx e^{\frac{RMR-41,8}{10,5}}$	0,66	Abad et al. (1984)
$RMR = 9 \ln Q + 44$	$Q \approx e^{\frac{RMR-44}{9}}$	0,77	Bieniawski (1984)

Estas correlações foram baseadas num total de 115 estudos, destacando a contribuição de Bieniawski (1984) com 77 casos, e de Singh & Goel (1999), com 34 casos. Distingue-se ainda a sugestão de Rutledge & Preston (1978), cuja proposta apresenta o coeficiente de correlação mais elevado, de 0,81. Mais tarde, em 1995, Barton sugeriu uma nova proposta de correlação entre o índice $RMR|_{89}$ e *Q-system*, o qual se demonstra na equação 13.

Equação 13 - Correlação entre $RMR|_{89}$ e *Q-system* proposto por Barton (1995).

$$RMR|_{89} = 15 \times \log Q + 50 \quad \text{ou} \quad Q \approx 10^{\frac{RMR_{89}-50}{15}}$$

2.4.7.2. Sustimento de túneis a partir de $RMR|_{89}$ e *Q-system*

A partir das correlações de $RMR|_{89}$ e *Q-system* propostas por Bieniawski (1984) e Barton (1995), é possível recomendar o método de sustimento de um túnel e a sua respetiva geometria, através do ábaco representado na figura 17.

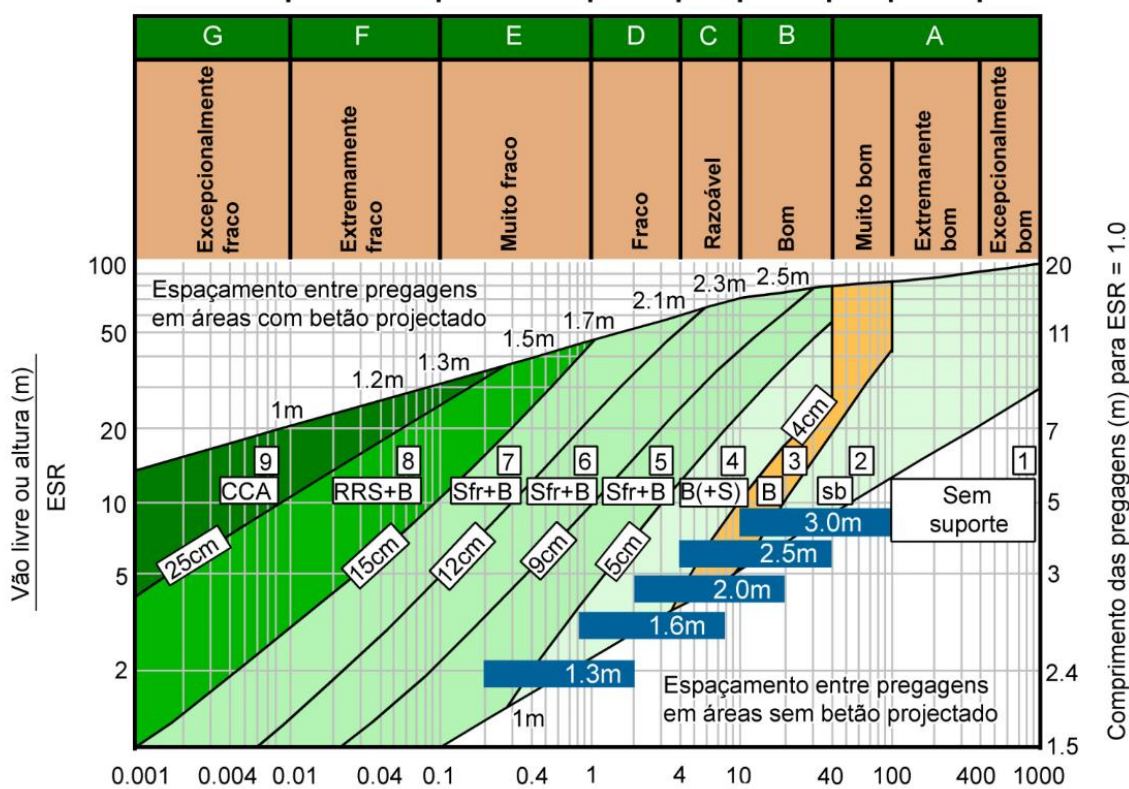
$$RMR_{89} \approx 9 \ln Q + 44 \quad (\text{Bieniawski 1989})$$

$$Q \approx e^{\frac{RMR_{89} - 44}{9}} \quad \mathbf{1}$$

$$RMR_{89} \approx 15 \log Q + 50 \quad (\text{Barton 1995})$$

$$Q \approx 10^{\frac{RMR_{89} - 50}{15}} \quad \mathbf{2}$$

1	$RMR_{89} \approx -18.2$	2.6	23.3	44	56.5	64.7	77.2	85.4	97.9	106.2
2	$RMR_{89} \approx 5$	20	35	50	59	65	74	80	89	95



- 1 - Sem suporte
- 2 - Pregagens pontuais, sb
- 3 - Pregagens sistemáticas, B
- 4 - Pregagens sistemáticas (e betão projectado não armado, 4 - 10 cm), B (+ S)
- 5 - Betão projectado com fibras e pregagens (5 - 9 cm) Sfr + B
- 6 - Betão projectado com fibras e pregagens (9 - 12 cm) Sfr + B
- 7 - Betão projectado com fibras e pregagens (12 - 15 cm) Sfr + B
- 8 - Betão projectado com fibras (> 15 cm), arcos de betão projectado armado, e pregagens, Sfr + RRS + B
- 9 - Betão moldado, CCA

$$\text{Qualidade do maciço rochoso} \quad Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Figura 17 - Soluções de sustimento de acordo com o Q-system em correlação com a Rock Mass Rating (RMR_{89}), com base nas propostas de Grimstad & Barton, 1993 e Barton, 2000 (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).

2.4.7.3. Estimativa do tempo de auto-sustimento

De acordo com o vão livre, cuja expressão se encontra na equação 10, juntamente com o Rock Mass Rating (RMR_{89}), ou com Q-value, é possível determinar o tempo de auto-sustimento, ou stand-up time, do maciço rochoso (ver figura 18).

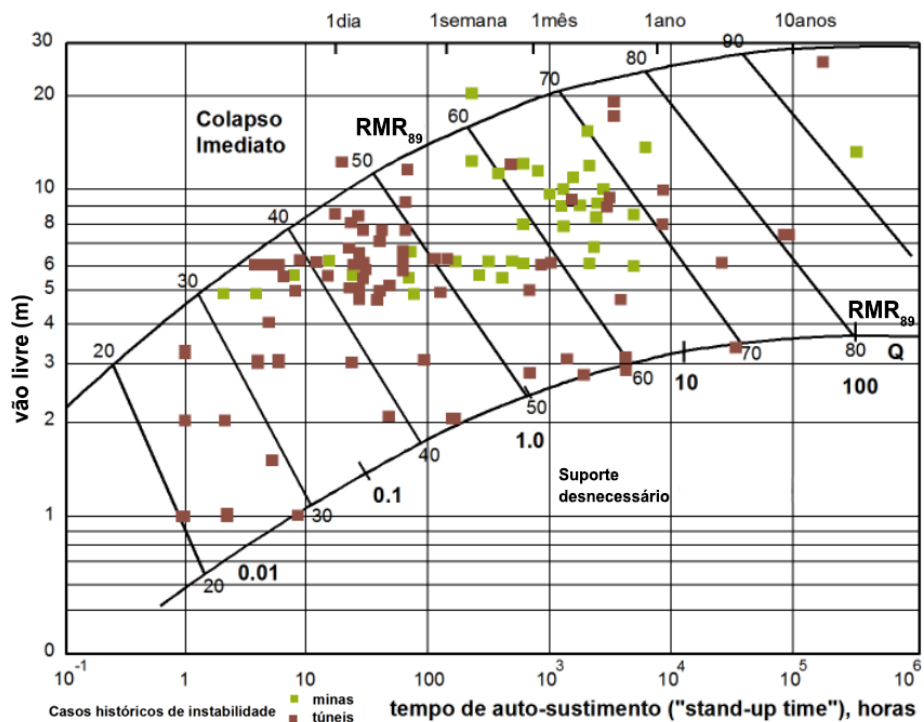


Figura 18 - Estimativa do tempo de auto-sustentação do maciço rochoso com base no vão livre e no índice $RMR/_{89}$, com casos históricos de Bieniawski (1989). Conversão de $RMR/_{89}$ para Q -value a partir de Barton (1995) (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).

2.4.7.4. Estimativa do módulo de deformabilidade do maciço rochoso (E_M) a partir de correlação entre RMR e Q -system

Consequente das dificuldades da realização do ensaio *in situ* para a obtenção do módulo de deformabilidade, e os elevados custos do mesmo, a abordagem empírica e indireta deste parâmetro pode ser vantajosa, com parâmetros de relevância do maciço rochoso adquiridos facilmente a baixo custo (Palmström & Singh, 2001). O quadro 19 apresenta quatro expressões de estimativas indiretas do módulo de deformabilidade do maciço rochoso.

Quadro 19 - Expressões para o cálculo do módulo de deformabilidade do maciço rochoso a partir das classificações RMR ou Q -system (Bieniawski, 1978, 1989; Serafim & Pereira, 1983; Grimstad & Barton, 1993; Barton & Bieniawski, 2008).

Módulo de deformabilidade (GPa)	Condição	Autor(es)
$E_M = 2 \times RMR - 100$	$RMR > 50$	Bieniawski (1978)
$E_M = 10^{\frac{RMR-10}{40}}$	$RMR < 50$	Serafim & Pereira (1983)
$E_M = 25 \log Q$	$Q > 1$	Grimstad & Barton (1993)
$E_M = 10 \times Q^{1/3}$	-	Barton & Bieniawski (2008)

A figura 19 apresenta as equações propostas por Bieniawski (1978, 1989), Serafim & Pereira (1983) e Barton & Bieniawski (2008), relacionadas com o módulo de deformabilidade (E_M), a partir do $RMR|_{89}$ ou Q -system. Clerici (1993) concluiu que a equação proposta por Serafim & Pereira (1983) resultará em valores com variação $\pm 15\%$ dos valores medidos *in situ*.

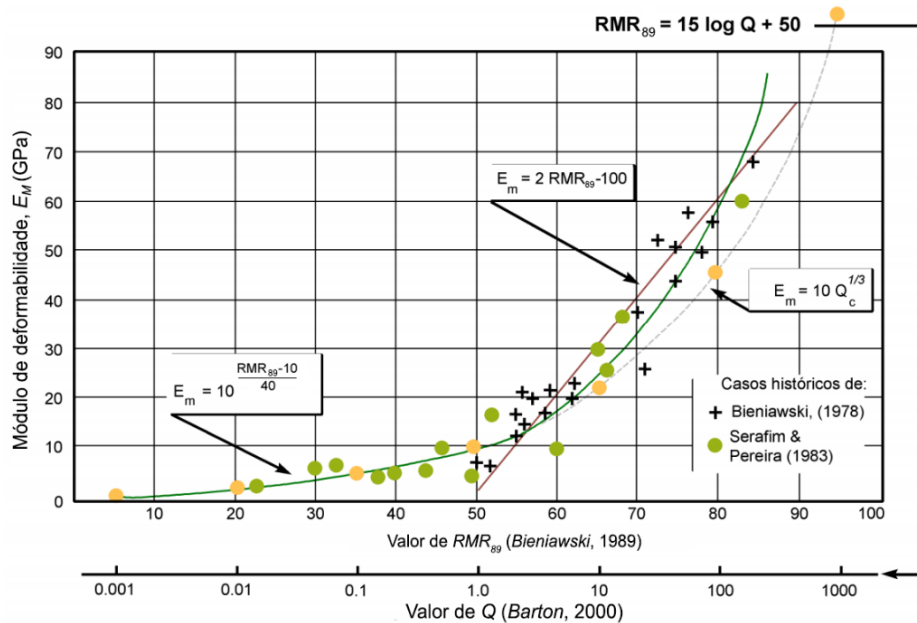


Figura 19 - Determinação do módulo de deformabilidade do maciço rochoso a partir de $RMR|_{89}$ e Q -system, com casos históricos de Bieniawski (1978) e Serafim & Pereira (1983). Conversão de RMR para Q -value a partir de Barton (1995) (adaptado de Barton & Bieniawski, 2008).

2.4.8. Geological Strength Index, GSI

O *Geological Strength Index (GSI)* foi elaborado por Hoek (1994) e mais tarde desenvolvido por Hoek & Brown (1997) e é aplicado em maciços rochosos competentes e brandos. Esta classificação é simples, rápida, mas fiável no que respeita à inspeção visual do maciço rochoso (Shah & Hoek, 2011). Este índice geológico-geomecânico varia entre 0 e 100, e fundamenta-se no conceito de que a resistência mecânica do maciço rochoso depende das características da rocha intacta e do comportamento dos blocos sob diferentes condições de tensão. O critério de rotura de Hoek & Brown (1980a,b), em que o *GSI* se baseia, permite prever o comportamento mais provável do maciço rochoso em resposta a um conjunto de tensões induzidas. Esta reação dependerá essencialmente da compartimentação do maciço rochoso e dos processos dinâmicos nele solicitados (Hoek & Brown, 1980a). A expressão do critério de rotura encontra-se representado na equação 14.

Equação 14 - Relação empírica entre as principais tensões efetivas à rotura (Hoek & Brown, 1980a).

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma'_c \times \sqrt{\frac{m_i \times \sigma'_3}{\sigma'_c} + s}$$

Onde:

σ'_1 e σ'_3 representam a tensão efetiva principal máxima e mínima de rotura, respetivamente;

σ'_c é a resistência à compressão simples da rocha intacta;

m_i trata-se da constante da rocha intacta;

s define a constante do material, $s = 1$ para materiais rochosos.

2.4.8.1. Índice geológico-geomecânico, $GSI|_{1998}$ e $GSI|_{2000}$

Os parâmetros considerados para a determinação do $GSI|_{1998}$ (Hoek et al. 1998) ou $GSI|_{2000}$ (Hoek & Marinos, 2000) encontram-se representados na figura 20.

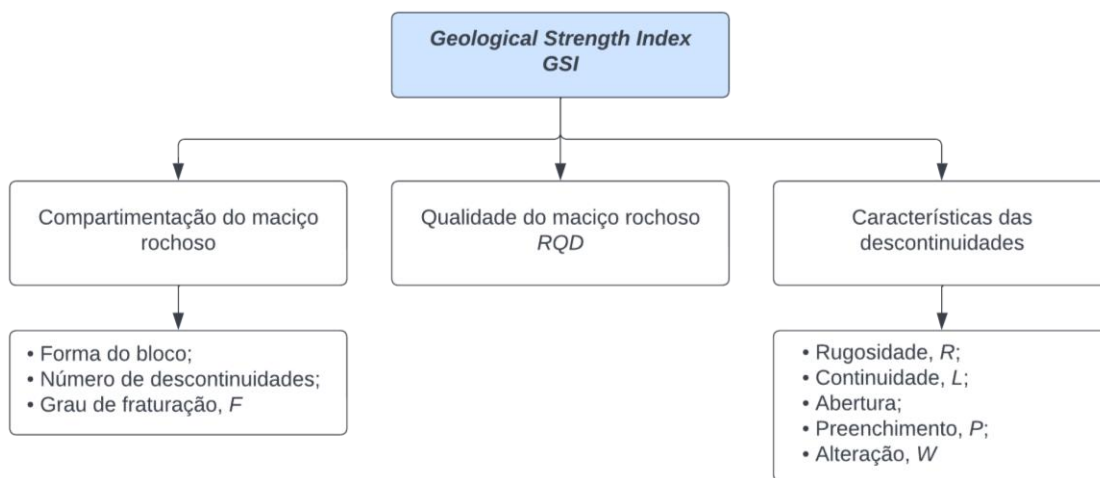


Figura 20 - Parâmetros para a determinação da versão 2000 ($GSI|_{2000}$) ligeiramente melhorada da versão 1998 (adaptado de Hoek et al. 1998; Hoek & Marinos, 2000).

As características das descontinuidades fundamentais para a determinação do $GSI|_{2000}$ referem-se ao *Joint Condition Factor* ($J_{C|89}$), equivalente à soma dos pesos da rugosidade, continuidade, abertura, preenchimento e alteração (Parâmetro 4 representado no quadro 12) do índice $RMR|_{89}$ (Bieniawski, 1973, 1989, 1993; Celada et al., 2014; Celada & Bieniawski, 2020). Desta forma, a obtenção do $GSI|_{2000}$ pode ser feita através do ábaco da figura 21.

A sua determinação depende essencialmente do parâmetro $J_{C|89}$ (Bieniawski, 1989), e do volume do bloco (V_b) ou espaçamento das descontinuidades do maciço rochoso, F (ISRM, 1978, 1981).



Figura 21 - Ábaco para a estimativa de $GSI/2000$ para rochas cristalinas fraturadas (adaptado de Marinos & Hoek, 2000; Cai et al., 2004; Santa et al., 2019).

2.4.8.2. Índice geológico-geomecânico, $GSI/2013$

Mais tarde, em 2013, Hoek et al. sugeriram uma atualização ao $GSI/1998$ e $GSI/2000$. Em substituição do volume do bloco, é utilizada metade do RQD (Deere et al., 1967) e invés do J_{C189} , é utilizado 150% deste valor. Complementarmente, esta atualização permitirá, também, estimar o GSI , dado pela equação 15. O ábaco referente ao $GSI/2013$ encontra-se na figura 22.

Equação 15 – Fórmula para aquisição do $GSI/2013$ (Hoek et al., 2013).

$$GSI = 1,5 \times J_{C89} + \frac{RQD}{2}$$

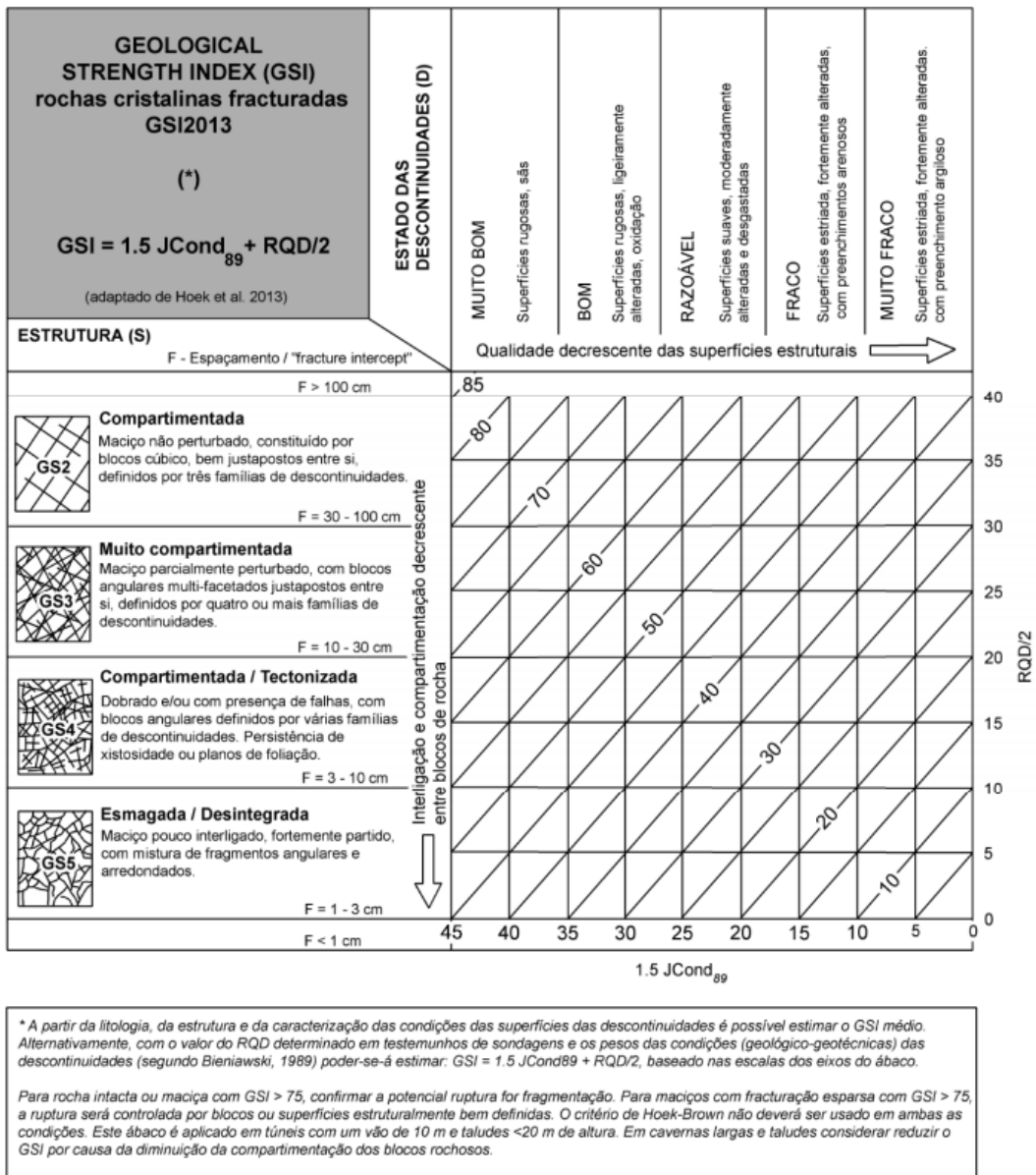


Figura 22 - Quantificação do $GSI/2013$ através do fator de condição das descontinuidades e RQD (adaptado de Hoek et al., 2013; Santa et al., 2019).

2.4.8.3. Correlações com $RMR/89$ e Q -system

É possível estimar o GSI a partir dos índices $RMR/89$ e Q -system, ambos com algumas condicionantes. As expressões para a determinação do GSI a partir destas classificações, bem como as suas condições e limitações a nível de $RMR/89$ e Q -system, encontram-se no quadro 20.

Quadro 20 - Aproximações empíricas ao *GSI* (Barton et al., 1974; Bieniawski, 1989; Hoek & Brown, 1997).

Parâmetro	Expressão	Condição
GSI <i>Geological Strength Index</i>	$GSI = RMR'_{89} - 5$	$GSI \geq 18$ ou $RMR \geq 23$
	$GSI = 9 \ln Q' + 44$	$GSI < 18$
RMR'₈₉ <i>Rock Mass Rating</i>	O RMR'_{89} é semelhante ao RMR_{89} , com a limitação de que o parâmetro da percolação da água (Parâmetro 5), cuja soma do peso deverá ser 15, transcrevendo-se para um maciço completamente seco, e o ajuste do resultado conforme a orientação das descontinuidades (Parâmetro 6), o qual deverá ser nulo, ou seja, estas se encontram a favor da direção da escavação (Bieniawski, 1989).	
Q' Qualidade do maciço rochoso modificado	$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a}$	Não é considerado o fator de redução do caudal da água nem o fator de segurança, <i>SRF</i> (Barton et al., 1974).

Em semelhança às restantes classificações geomecânicas, o *GSI* oferece uma reflexão acerca da qualidade do maciço rochoso conforme o seu resultado. O quadro 21 apresenta as classes de qualidade do maciço rochoso de acordo com o respetivo intervalo de *GSI*.

Quadro 21 - Qualidade do maciço rochoso consequente de *GSI* (adaptado de Hoek, 2007).

Intervalo de <i>GSI</i>	> 75	55 - 75	35 - 55	20 - 35	< 20
Qualidade do maciço rochoso	Muito bom	Bom	Razoável	Fraco	Muito fraco

2.4.8.4. Determinação do módulo de deformabilidade do maciço rochoso (E_M)

Paralelamente, através do *GSI*, é possível estimar indiretamente o módulo de deformabilidade. Hoek & Brown (1997) propõem a seguinte expressão para o cálculo deste parâmetro (equação 16).

Equação 16 - Estimativa indireta do módulo de deformabilidade a partir da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta e de *GSI* (Hoek & Brown, 1997).

$$E_M(GPa) = \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \times 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$$

Onde σ_c representa a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, em MPa, medida em amostras com 50 mm de diâmetro. A equação é aplicada apenas em casos onde $\sigma_c < 100$ MPa (Hoek & Brown, 1997).

2.4.9. Surface Rock Classification, SRC

A *Surface Rock Classification (SRC)* é baseada na classificação *RMR* (Bieniawski, 1989, 1993), cujas diferenças são a contabilização do estado de tensão do maciço rochoso e alguns fatores de correção

aplicados na SRC. Os fatores de correção têm em conta a influência da escavação no maciço rochoso, e utiliza dados provenientes de afloramentos (González de Vallejo, 1983, 2003). A figura 23 apresenta os parâmetros para a determinação do índice SRC.

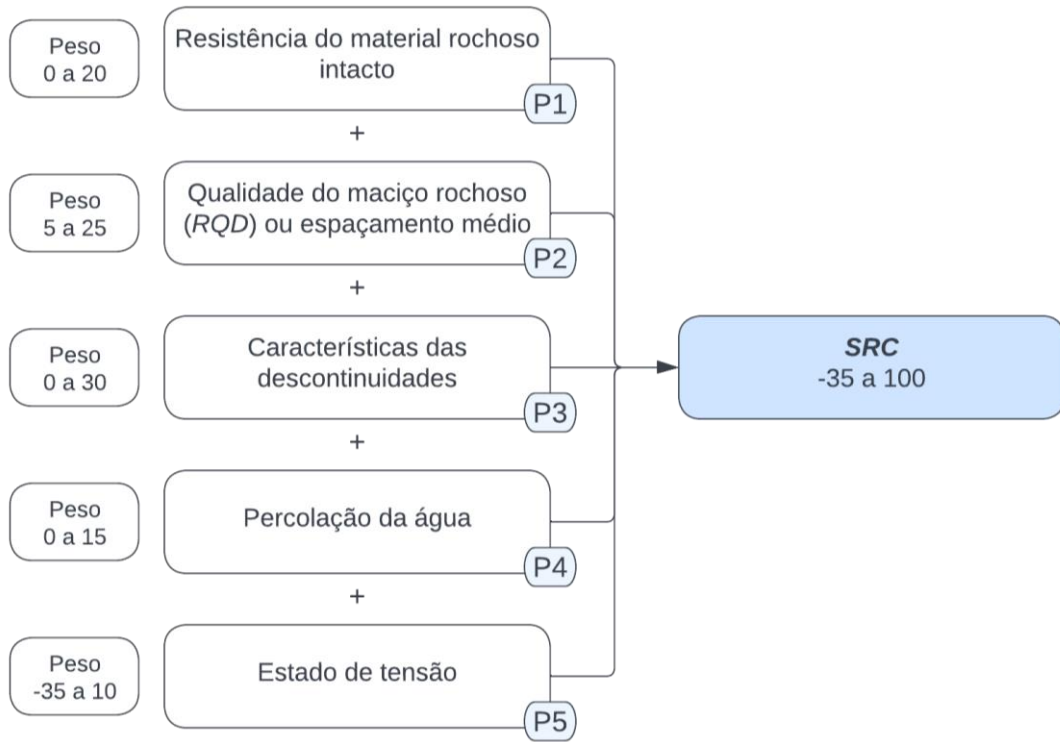


Figura 23 - Parâmetros para a determinação do índice SRC (adaptado de González de Vallejo, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

O estado de tensão é determinado através dos seguintes fatores representados na figura 24.

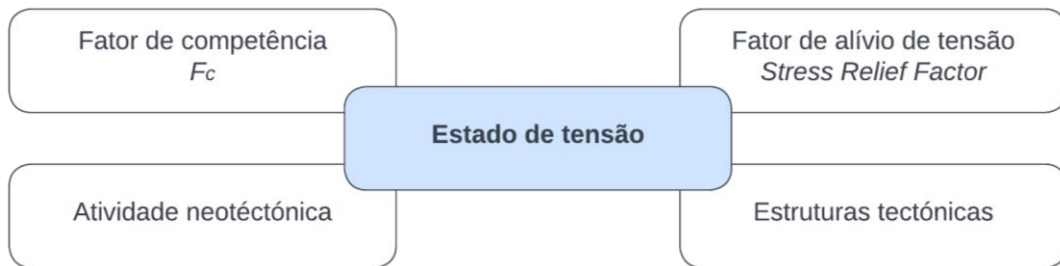


Figura 24 - Indicadores para a determinação do estado de tensão do maciço rochoso para a SRC (González de Vallejo, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

O fator de competência, F_c , é dado através da equação 17.

Equação 17 - Expressão para o cálculo do fator de competência (González de Vallejo, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

$$F_c = \frac{\sigma_c}{\sigma_v}$$

Onde σ_c refere-se à resistência à compressão uniaxial da rocha intacta e σ_v trata-se da tensão vertical máxima. O fator de competência permite distinguir três condições de estabilidade, as quais se encontram descritas no quadro 22.

Quadro 22 - As três conclusões de estabilidade determinadas pelo fator de competência (González de Vallejo, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

$F_c \geq 10$	A rocha intacta tem uma resistência muito superior à tensão vertical máxima aplicada no maciço rochoso, pelo que se prevê que a escavação seja estável.
$10 > F_c > 2$	O tempo e as propriedades da rocha condicionam a estabilidade. Podem ser identificados três tipos de deformações: elásticas, plásticas e de rotura frágil, incluindo o risco de rotura.
$F_c \leq 2$	As tensões excedem a resistência da rocha intacta, pelo que a escavação pode ser instável.

O *Stress Relief Factor*, ou fator de alívio de tensão é o quociente entre a idade, em anos $\times 10^{-3}$, desde a última atividade tectónica orogénica que afetou a região e a espessura máxima da camada de recobrimento, em metros, durante a sua história geológica (González de Vallejo, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Em semelhança ao $RMR/_{89}$, a classificação *SRC* apresenta correções a aplicar caso o estudo seja realizado num talude. Estas correções aplicam-se aos parâmetros de espaçamento e *RQD* (Deere et al., 1967), condições das descontinuidades e percolação da água (quadro 23).

O indicador da atividade neotectónica é apenas considerado se a região tem histórico de atividade tectonossísmica significativa. Finalmente, o parâmetro das estruturas tectónicas é contabilizado quando existem na área estruturas tectónicas ou falhas de dimensões expressivas. O quadro 24 apresenta todos os fatores considerados para a determinação do *SRC*, com a respetiva classe de maciço rochoso a nível de qualidade.

Quadro 23 - Correções ao fator *SRC* aplicados quando a classificação é desenvolvida em taludes (adaptado de González de Vallejo, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Espaçamento ou <i>RQD</i> (A pontuação para este parâmetro está limitada a 25)			
Fraturas por compressão	$\times 1,3$	Grau de alteração = W_{4-5}	$\times 0,8$
Fraturas por tensão	$\times 0,8$	Grau de alteração = W_3	$\times 0,9$
Para profundidades < 50 m	$\times 1,0$	Grau de alteração = W_{1-2}	$\times 1,0$
Condições das descontinuidades (A pontuação para este parâmetro está limitada a 30)		Percolação da água (A pontuação para este parâmetro está limitada a 15)	
Fraturas por compressão	+5	Fraturas por compressão	+5
Fraturas por tensão	+0	Fraturas por tensão	+0
Não aplicável em profundidades < 50 m		Não aplicável em profundidades < 50 m	

Quadro 24 - Fatores quantificados para a aplicação da classificação geomecânica SRC (adaptado de González de Vallejo, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Índices de qualidade da rocha	Intervalos de valores						
1. Resistência da rocha intacta							
Point-load test (MPa)	> 8	8 - 4	4 - 2	2 - 1	Não aplicável		
Compressão uniaxial (MPa)	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	< 1
Peso	20	15	7	4	2	1	0
2. Espaçamento ou RQD							
Espaçamento (m)	> 2	2 - 0,6	0,6 - 0,2	0,2 - 0,06	< 0,06		
RQD (%)	100 - 90	90 - 75	75 - 50	50 - 25	< 25		
Peso	25	20	15	8	5		
3. Condições das descontinuidades							
	Superfícies muito rugosas	Superfícies algo rugosas	Superfícies algo rugosas	Superfícies lisas ou com <i>slickensides</i>	Superfícies lisas ou com <i>slickensides</i>		
	Descontínuas	Descontínuas	Descontínuas	Contínuas	Contínuas		
	Fechadas	Aberta, < 1 mm	Abertas, = 1 mm	Abertas, 1 a 5 mm	Abertas, > 5 mm		
	Superfícies pouco alteradas	Superfícies duras e pouco alteradas	Superfícies brandas e alteradas	Superfícies com preenchimento	Superfícies com preenchimento		
Peso	30	25	20	10	0		
4. Fluxo de água							
Fluxo por cada 10 m de túnel (L/min)	Nenhum	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
Condições gerais	Seco	Ligeiramente húmida	Escoamento ocasional	Escoamento frequente	Escoamento abundante		
Peso	15	10	7	4	0		
5. Estado de tensão							
Fator de competência ¹	>10	10 - 5	5 - 3	< 3			
Peso	10	5	-5	-10			
Tectónica/Estrutura	Cavalgamentos / Carregamentos / Zonas de Cisalhamento e importância regional		Falhas Regionais (Compressão)	Falhas Regionais (Distensão)			
Peso	-5		-2	0			
Fator de Alívio de Tensão (Stress Relief Factor) ²	> 200	200 - 80	80 - 10	>10	Escorregamentos		
					200 - 80	79 - 10	< 10
Peso	0	-5	-8	-10	-10	-13	-15
Atividade Neotectónica	Nenhuma ou desconhecida		Baixa	Elevada			
Peso	0		-5	-1			
6. Classe do maciço rochoso							
Classe	I	II	III	IV	V		
Qualidade da rocha	Muito boa	Boa	Razoável	Fraca	Muito fraca		
Peso	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20		

¹ Quociente entre a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta e tensão vertical máxima (equação 17)

² Razão entre a idade da última deformação orogénica que afectou o maciço rochoso (em anos x 10⁻³) e o máximo de espessura de recobrimento (metros)

2.4.10. Rock Mass Index, RMI

O “Rock Mass Index”, $RMI|_{2000}$ foi introduzido por Palmström (1995), e trata-se de uma classificação volumétrica que relaciona a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (σ_c) e o efeito de redução das descontinuidades que terminam na rocha (jP). Este último, por sua vez, está dependente do fator de condição das descontinuidades (jC) e do volume do bloco (V_b). O fator das características das descontinuidades, à semelhança do *Q-system* (Barton et al., 1974), está relacionado com o fator de rugosidade (jR), fator de alteração (jA) e fator de persistência (jL) (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2014). Estes fatores encontram-se representados sucintamente na figura 25.

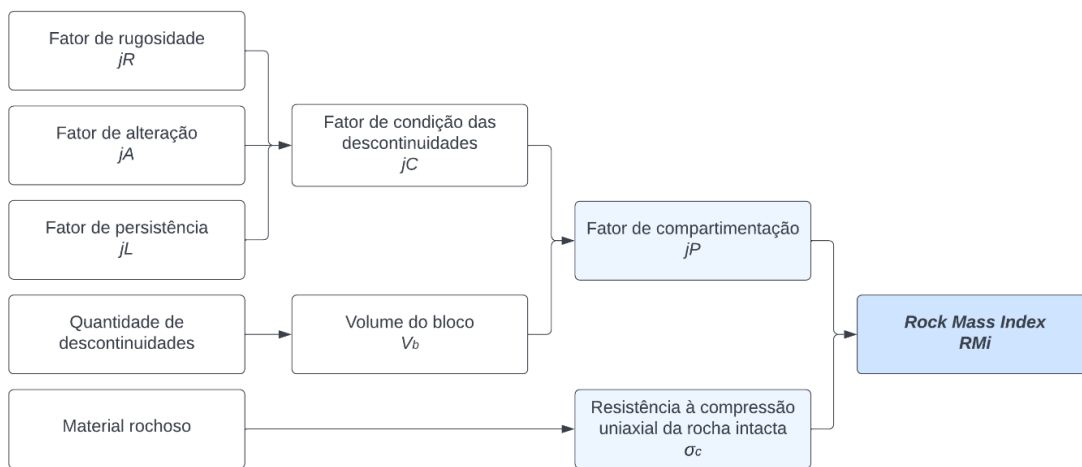


Figura 25 - Parâmetros para a determinação do $RMI|_{2000}$ (adaptado de Palmström, 1995, 1996a,b, 2000).

O fator de condição das descontinuidades (jC) é dado através da seguinte expressão (equação 18).

Equação 18 - Expressão de cálculo do fator de condição das descontinuidades (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2010, 2014).

$$jC = jL \times \frac{jR}{jA}$$

Consequentemente, e correlacionando com o volume do bloco (V_b) expresso na equação 1, o fator de compartimentação (jP) é obtido recorrendo à equação 19.

Equação 19 - Determinação do fator de compartimentação (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2010, 2014).

$$jP = 0,2 \times \sqrt{jC} \times V_b^{0,37 \times jC^{-0,2}}$$

Finalmente, o *Rock Mass Index* ($RMI|_{2000}$), toma partido do fator de compartimentação e da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta. A sua expressão de cálculo demonstra-se na equação 20.

Equação 20 - Fórmula de cálculo do *Rock Mass Index*, $RMI|_{2000}$ (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2010, 2014).

$$RMI = \sigma_c \times jP$$

O quadro 25 apresenta os diferentes pesos para a determinação do fator de rugosidade (jR), do fator de alteração das descontinuidades (jA) e o fator de persistência (jL).

Quadro 25 - Fatores de rugosidade, de alteração e de persistência das descontinuidades para o cálculo do seu fator de condições geológico-geotécnicas (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2010, 2014).

Classificação do fator de rugosidade da descontinuidades (jR), a partir da sua suavidade e ondulação					
Suavidade da superfície da descontinuidade a pequena escala	Ondulação dos planos de descontinuidade a grande escala				
	Planas	Ligeiramente onduladas	Onduladas	Muito onduladas	Estriadas
Muito rugosas	2	3	4	6	6
Rugosas	1,5	2	3	4,5	6
Lisas	1	1,5	2	3	4
Polidas ou estriadas	0,5	1	1,5	2	3
Para descontinuidades preenchidas, $jR = 1$; Para descontinuidades irregulares, é recomendado utilizar $jR = 5$					
Caracterização e classificação do fator de alteração das descontinuidades (jA)					
A. Contacto entre as duas superfícies das paredes					
Termo	Descrição				jA
Descontinuidades limpas					
• Descontinuidades cristalizadas	Preenchimento de materiais impermeáveis (i.e. quartzo, epidoto, etc.)				0,75
• Paredes da descontinuidade são	Sem revestimento ou preenchimento na superfície da descontinuidade, excepto coloração				1
• Alteração das paredes da descontinuidade					
- 1 grau mais alterado	A superfície da descontinuidade apresenta um grau de alteração superior à da rocha				2
- 2 graus mais alterado	A superfície da descontinuidade apresenta dois graus de alteração superior à da rocha				4
Descontinuidades com revestimento ou preenchimento fino					
• Areia, silte, calcite, etc.	Revestimento com materiais de fricção, sem argila				3
• Argila, clorite, talco, etc.	Revestimento com materiais brandos, moles e coesivos				4
B. Descontinuidades com preenchimento em contacto parcial ou nenhum contacto entre as superfícies das paredes					
Material do preenchimento	Contacto parcial entre as paredes		Sem contacto entre as paredes		
	Preenchimentos finos (< 5 mm)		Preenchimentos grossos		
	jA		jA		
Materiais de fricção (Areia, silte, calcice, etc.)	4		8		
Materiais duros e coesivos (Preenchimento compactado de argila, clorite, talco, etc.)	6		6 - 10		
Materiais brandos e coesivos (Argila, clorite, talco, etc. medianamente ou pouco sobreconsolidados)	8		12		
Materiais argilosos expansivos (Materiais do preenchimento exibem propriedades expansivas)	8 - 12		13 - 20		
Dimensão da descontinuidade e fator de persistência (jL)					
Persistência da descontinuidade	Termo	Tipo	jL		
			Terminação das descontinuidades obscura	Terminação de descontinuidades em rocha	
< 0,5 m	Muito pouco contínua	Estratificação/foliação	3	6	
0,1 - 1,0 m	Pouco contínua	Descontinuidade	2	4	
1 - 10 m	Medianamente contínua	Descontinuidade	1	2	
10 - 30 m	Contínua	Descontinuidade	0,75	1,5	
> 30 m	Muito contínua	Descontinuidade (preenchida), camada ou cisalhamento*	0,5	1	

*Ocorrem frequentemente como uma única descontinuidade, devendo, nestes casos, ser tratada separadamente

Em semelhança às restantes classificações geomecânicas, a partir do valor de $RMI/_{2000}$, é possível classificar o maciço rochoso a nível de qualidade, ainda permitindo a sua relação com a sua resistência (quadro 26).

Quadro 26 - Qualidade do maciço rochoso e a sua relação com a sua resistência através do $RMI/_{2000}$ (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2014).

Intervalo de RMI	Qualidade do maciço rochoso	Relacionando com a resistência do maciço rochoso
< 0,01	Extremamente baixa	Extremamente fraca
0,01 - 0,1	Muito baixa	Muito fraca
0,1 - 0,4	Baixa	Fraca
0,4 - 1	Moderada	Média
1 - 10	Alta	Boa
10 - 40	Muito alta	Muito boa
> 100	Extremamente alta	Extremamente boa

Para a realização automatizada dos cálculos e determinação do índice $RMI/_{2000}$ (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009), foi criada e desenvolvida, nesta dissertação, uma calculadora em *Ms. Excel* intitulada *RMI/CALC* (figura 26) de forma agilizar o cálculo dos diversos parâmetros e determinar o RMI .

RMi | Rock Mass Index

(Palmström, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2014)

Inputs

Insert Geotechnical Zoning:	ZG1.A
Block volume (V_b)	0,15 m ³
Uniaxial compressive strength (σ_c)	153,8 MPa
Tunnel diameter (Dt)	20,00 m
Wall height (Wt)	5,00 m
Overburden (z)	25,00 m
Poisson's ratio (ν)	0,30

Parameters to the RMi

Joint roughness factor (jR)

Small scale smoothness of joint surface	Rough
Large scale waviness of joint plane	Stepped or interlocking
Joint characteristics	Filled joints

jR | 1

Joint alteration factor (jA)

Contact between the two rock wall surfaces	Filled joints with partial wall
Characteristics ¹	Medium to low overconsolidation

jA | 8

Joint size and continuity factor (jL)

Type of discontinuity	Joint
Average joint length span (m)	1 - 10 m
Continuity	Continuous

jL | 1

Joint condition factor (jC)

jC | 0,1

Jointing parameter (jP)

D | 0,56

jP | 0,02

Rock Mass Index

Massivity parameter (f_{σ})	0,62
Type of rock	Jointed rock

RMi | 3,75

Classification of RMi | High

RMi | Rock Support Method

(Palmström, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2014)

Rock support adjustment factors for blocky grounds

Stress level

Approximate overburden	10 - 35 m
Stress level	Low
Tunnel with high walls?	Yes

SL | 0,5

Number of joint sets

Number of joint sets | One set + random

Nj | 2

Orientation of joints

Location of joints	In roof
Strike	All strikes
Dip	< 20°
Term	Very unfavourable

Co and Co_s | 3

Inclination of roof or walls

Inclination of roof or walls | 30° inclination

C | 1,5

Ground quality

Ground condition factor | 3,75

Adjusted ground condition factor (Gc) | 2,81

Scale factor

Block diameter (Db)	0,53 m
Continuity factor (CF)	37,64

Size ratio | 37,64

Adjusted size ratio (Sr) | 56,46

Figura 26 - Funcionalidades da aplicação RMi/CALC. A) Tabela de inserção de dados; B) Parâmetros corretivos para o cálculo de índice RMi/2000; C) Estimativa do 'ground condition factor' e do 'size ratio'.

Após o cálculo do índice RMi/2000, a calculadora possibilita estimar uma proposta de sustimento do túnel. Esta proposta, representada na figura 26.C, vai depender de fatores geométricos, como o diâmetro do túnel, a altura dos hasteais e a sobrecarga ('overburden'), e as características do maciço rochoso, como a resistência à compressão uniaxial, o volume do bloco unitário e o coeficiente de Poisson (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2010, 2014). Desta forma,

considerando os valores ajustados do 'Ground Condition Factor' (G_c) e do 'Size Ratio' (S_r), é possível determinar os métodos de sustimento recomendados e a sua respetiva geometria, como demonstrado na figura 27.

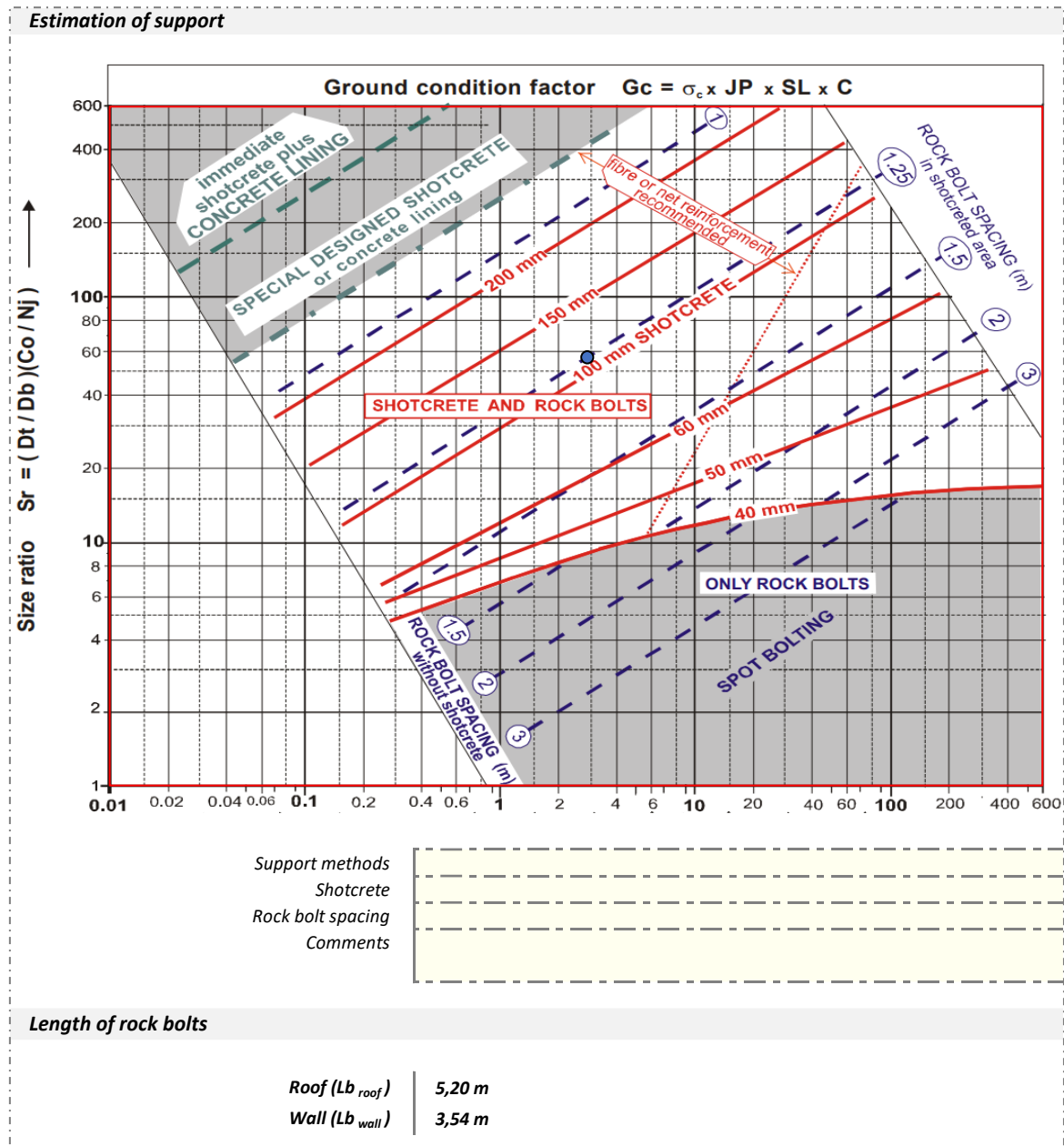


Figura 27 - Ábaco para a determinação da proposta de sustimento do túnel através dos fatores G_c e S_r e comprimento recomendado das pregagens no teto e hasteais (Palmström, 1995, 2000, 2009).

Capítulo III

SIG e ferramentas geo-informáticas em geotecnia e geociências aplicadas

SIG e ferramentas geo-informáticas em geotecnia e geociências aplicadas

3.1.

Conceitos básicos da cartografia aplicada às geociências de engenharia e geotecnia

3.2.

Caracterização, classificação e conteúdo dos mapas geotécnicos

3.3.

Importância das cartografias de zonamento geotécnico e geomecânico em recursos geológicos

3.4.

Sistemas de informação geográfica (SIG)

(página propositadamente em branco)

3. SIG e ferramentas geo-informáticas em geotecnia e geociências aplicadas

"Cartography is the discipline dealing with the art, science and technology of making and using maps"

International Cartographic Association (2003 - 2011)

3.1. Conceitos básicos da cartografia aplicada às geociências de engenharia e geotecnia

De acordo com a *ICA (International Cartographic Association)*, um mapa é uma representação baseada em simbologia de uma dada realidade geográfica, retratando características derivadas do esforço criativo do seu autor, e é idealizado para a sua utilização quando as relações espaciais são de extrema relevância.

Em 1966, a *ICA* estabeleceu a definição de cartografia como o “conjunto de estudos e operações científicas, técnicas e artísticas que, tendo por base os resultados de observações diretas, ou da análise de documentação, foca-se na elaboração de mapas, cartas e outras formas de expressão ou representação de objetos, elementos, fenômenos e ambientes físicos e socioeconômicos, bem como a sua utilização”. A definição mais recente, proposta pela *ICA*, em 2003, afirma que a cartografia é a “habilidade singular para a criação e manipulação de representações, visuais ou virtuais, do espaço geográfico – mapas – permitindo a exploração, análise, compreensão e comunicação de informação acerca desse espaço”. De certa forma, segundo a *ICA*, a cartografia é uma disciplina que mistura arte, ciência e técnica na preparação, execução e produção de mapas ou cartas.

Os mapas geológicos apresentam genericamente, sobre uma base topográfica, a litologia e a estrutura de uma dada região ou local. Todavia, apresentam limitações a nível de dados semi-quantitativos, quantitativos das propriedades físicas e mecânicas dos materiais geológicos, havendo, por isso, necessidade de recorrer a uma cartografia aplicada e mais aprimorada para a sua aplicação em projetos de engenharia (González de Vallejo & Ferrer, 2011).

A cartografia de geologia de engenharia e a cartografia geotécnica, tratam de um domínio específico da cartografia, sendo empregues na apresentação de informação geológica e geotécnica para ordenamento e planeamento territorial de áreas periurbanas ou urbanas, para delinear, construir e manter infraestruturas de engenharia (e.g., Dearman, 1991; Zuquette & Gandolfi, 2004; Griffiths, 2014; Chaminé et al., 2016). Fornecem ainda dados relacionados com as propriedades do terreno e subsolo de uma área específica, de modo a permitir a avaliação do seu comportamento geomecânico e na previsão de futuros problemas geológicos e geotécnicos (e.g., Dearman, 1991; Zuquette & Gandolfi, 2004; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Chaminé & Fernandes, 2023).

Assim, os mapas geotécnicos devem ter em consideração diversos aspetos gerais relevantes à engenharia geotécnica e a geologia de engenharia. Esses aspetos, juntamente com os parâmetros que influenciam o conteúdo, detalhe e complexidade da cartografia encontram-se delineados na figura 28.

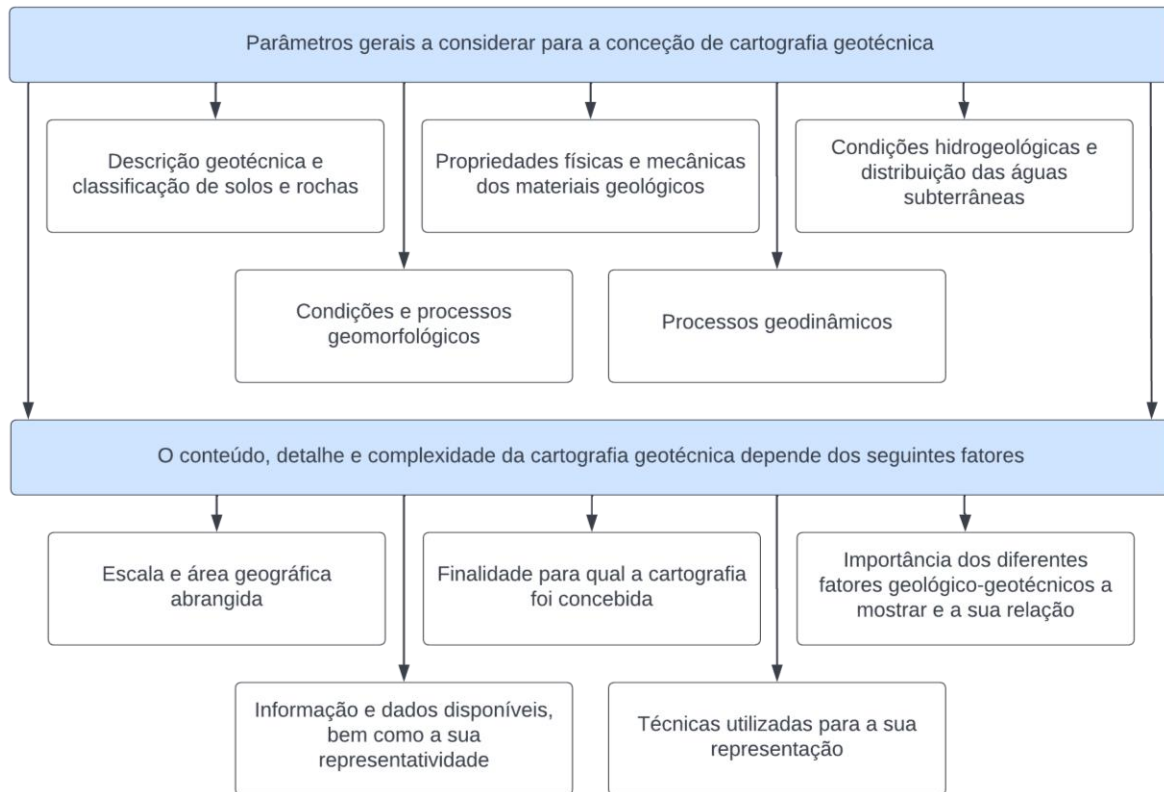


Figura 28 - Aspetos gerais relacionados com a engenharia geotécnica para a concepção de mapas geotécnicos e fatores que influenciam o conteúdo, detalhe e complexidade dos mesmos (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Embora imprescindível para apoiar a concepção ('design') racional de projetos de engenharia, na previsão de problemas geológico-geotécnicos numa dada área e no planeamento de investigações locais, a cartografia de geologia de engenharia e a cartografia geotécnica não substituem, de facto, as investigações geotécnicas *in situ* (pormenores, por exemplo, em González de Vallejo & Ferrer, 2011; Griffiths, 2014; Chaminé & Fernandes, 2023; Fernandes & Chaminé, 2023).

3.2. Caracterização, classificação e conteúdo dos mapas geotécnicos

Os mapas geotécnicos, ou de geologia de engenharia, devem incluir uma informação descritiva dos materiais geológicos e processos, dados quantitativos nas diferentes componentes do meio geológico, das propriedades petrofísicas e mecânicas dos materiais e informação interpretativa da sua aplicação em engenharia ou geotecnia (Dearman, 1991; Zuquette & Gandolfi, 2004; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

A cartografia geotécnica é desenvolvida em escalas apropriadas de acordo com o seu intuito, a qual terá um impacto no seu conteúdo geológico-geotécnico. O objetivo do mapa pode ser amplo ou específico, que dependerá do tipo de conteúdo nele apresentado (analítico ou temático, compreensivo, auxiliar ou complementar) (e.g., UNESCO-IAEG, 1976; Dearman, 1991; Hrašna & Vlčko, 1994; Griffiths, 2002; Zuquette & Gandolfi, 2004; Proske et al., 2005). A figura 29 apresenta uma descrição dos tipos de finalidade, conteúdo e escala dos mapas geotécnicos.

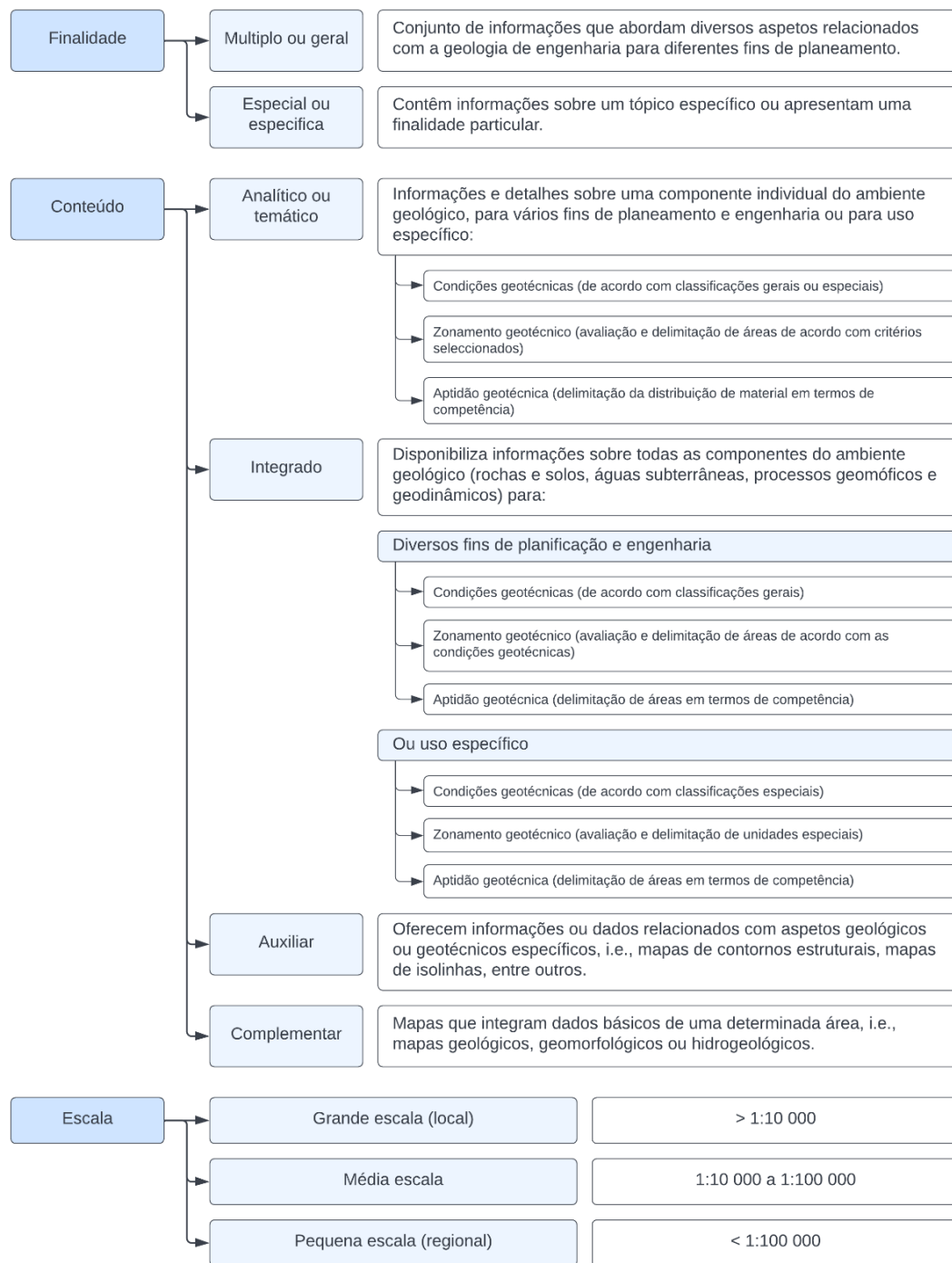


Figura 29 - Classificação dos mapas geotécnicos de acordo com o seu propósito, temática e escala (adaptado de: UNESCO-IAEG, 1976; Dearman, 1991; Hrašna & Vıcko, 1994; Griffiths, 2002; Proske et al., 2005; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Chaminé et al., 2016;

No quadro 27 está descrita a classificação dos mapas de acordo com a escala e conteúdo, bem como a metodologia recorrida para o seu mapeamento e o seu campo de aplicação.

Quadro 27 - Classificação dos mapas geotécnicos conforme a sua escala (adaptado de Dearman, 1991; Griffiths, 2002; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Chaminé et al., 2016; Chaminé & Fernandes, 2023).

Tipo e escala	Conteúdo	Metodologia do mapeamento	Campo de aplicação
Regional > 1:10 000	Dados geológicos, litologias, estruturas tectónicas, características morfológicas regionais, grandes áreas afetadas pelos processos. Informação geral e interpretações de interesse geotécnico.	Técnicas de deteção remota e fotografia aérea, adaptação de mapas topográficos e geológicos anteriores, consultas bibliográficas e observações de campo.	Estudos e planeamento preliminares, informação geral sobre a região, tipos de material geológico e processos geomorfológicos.
Local (fase de levantamento preliminar) 1:10 000 a 1:500	Descrição e classificação de solos e rochas, estruturas tectónicas, morfologia, condições hidrogeológicas, processos geodinâmicos, localização de possíveis materiais de construção.	Técnicas de deteção remota e fotografia aérea, observações e levantamentos de campo.	Planeamento e viabilidade das obras e reconhecimento detalhado do local. Conceção básica.
Local (fase de investigação <i>in situ</i>) 1:5 000 a 1:500	Propriedades dos materiais, condições geotécnicas e outros aspetos relevantes para a realização de um projeto de construção.	Dados recolhidos dos mapas locais e regionais, dados derivados da prospeção geotécnica e poços, prospeção geofísica e ensaios <i>in situ</i> e de laboratório.	Informação detalhada sobre os locais e previsão de problemas geológico-geotécnicos. Conceção e análises detalhadas.

Independentemente do propósito, conteúdo ou escala do mapa, os mapas geotécnicos apresentam ainda uma série de parâmetros gerais que devem ser incluídos (figura 30).

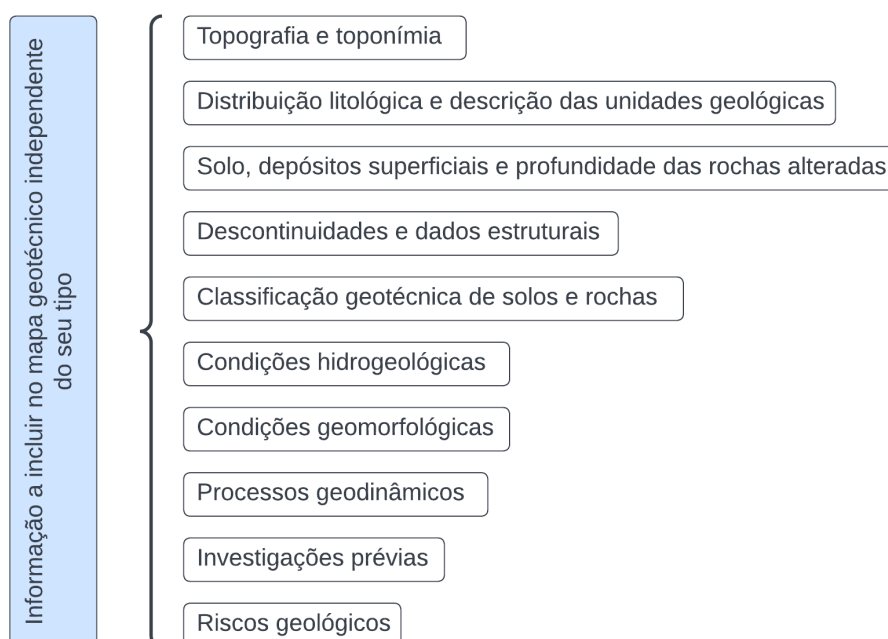


Figura 30 - Informação básica que deve constar em qualquer mapa geotécnico (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Os aspetos mais relevantes a desenvolver no âmbito da dissertação são os índices geotécnicos e as classificações geomecânicas de maciços rochosos, com destaque para o material-rocha, bem como as suas propriedades e as condições geotécnicas.

As condições hidrogeológicas são essenciais em mapas geotécnicos destinados ao planeamento e ordenamento territorial, gestão de recursos hídricos e na escolha de áreas destinadas a projetos de engenharia relacionados com esta disciplina, nomeadamente locais para depósito de resíduos urbanos ou outros tipos de resíduos (Zuquette & Gandolfi, 2004; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Os processos geodinâmicos refletem o carácter dinâmico do meio geológico. Este aspeto deve ser incluído na cartografia geotécnica, e deve fornecer informação espacial e dados relativos aos processos dinâmicos internos e externos em funcionamento. Os processos geodinâmicos e o seu correto mapeamento são fulcrais para o estudo sobre perigosidade e risco geológico, os quais poderão afetar áreas povoadas, infraestruturas e edifícios (González de Vallejo & Ferrer, 2011).

3.2.1. Classificação geotécnica de solos e rochas

As características dos solos e rochas têm uma grande expressão na realização de cartografia geotécnica. A sua delimitação em mapas geotécnicos é feita através da uniformização das propriedades petrofísicas e mecânicas do material, como a resistência, a deformabilidade, a permeabilidade e a durabilidade (Zuquette & Gandolfi, 2004; González de Vallejo & Ferrer, 2011). A correlação entre as propriedades geológicas e as propriedades geotécnicas, bem como o método de classificação dos solos e das rochas e os parâmetros geológico-geotécnicos gerais a representar nos mapas geotécnicos encontram-se sintetizados no quadro 28.

Quadro 28 - Relação entre as propriedades geológicas e geotécnicas e os parâmetros geológico-geotécnicos a incluir numa cartografia geotécnica (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Propriedades geológicas	Propriedades geotécnicas	
	Rochas	Solos
Composição mineralógica e litológica	Relacionadas com a densidade e plasticidade	
	Determina a resistência, dureza e alterabilidade	Determina a consistência e alterabilidade
Textura e estrutura dos materiais	Relacionadas com a densidade e porosidade	
	Condicionam o comportamento geomecânico	
Condições hidrogeológicas	Condicionam a consistência e o grau de alteração	
Condições das discontinuidades (frequência, tipo de discontinuidade e grau de alteração)	Condicionam a resistência, deformabilidade e permeabilidade	-
Classificação geotécnica	Propriedades petrofísicas e mecânicas, ISRM (1978, 1981)	Sistema de classificação unificado <i>USCS</i> , ASTM (West, 1991) ensaio de Casagrande
	Correlações empíricas e índices de campo	
	Permitem avaliar e quantificar as propriedades geotécnicas	
Parâmetros geológico-geotécnicos a representar na cartografia geotécnica	Densidade, porosidade, consistência e atividade mineralógica, permeabilidade, resistência à compressão uniaxial e à tração, deformabilidade, durabilidade e alterabilidade	

A IAEG (1981a,b) propôs um procedimento para a descrição e classificação geológico-geotécnica de solos e rochas em projeção da cartografia geotécnica (figura 31).

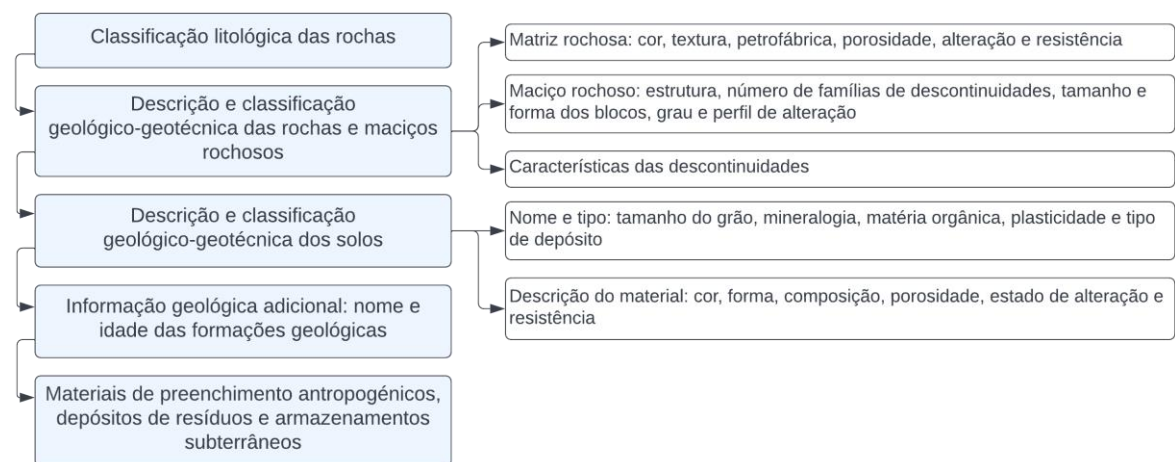


Figura 31 - Descrição e classificação geológico-geotécnica de maciços rochosos e terrosos com vista à cartografia geotécnica (adaptado de IAEG, 1981a,b; Griffiths, 2002).

3.2.2. Condições geomorfológicas

As condições geomorfológicas transcrevem as formas e paisagens do território, moldado por fatores geodinâmicos e geomórficos ao longo do tempo. A informação relativa às condições geomorfológicas e processos de relevância aquando da sua aplicação em cartografia geotécnica encontram-se listados na figura 32.

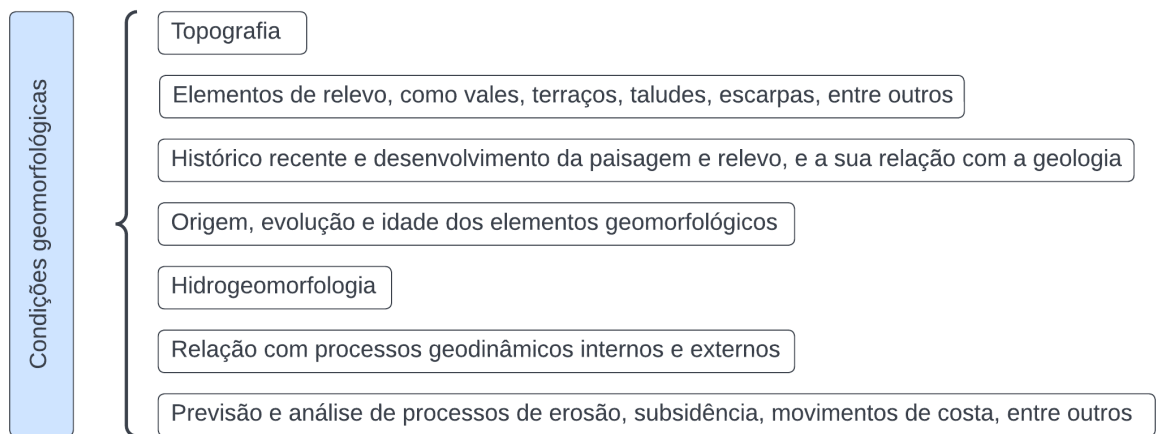


Figura 32 - Informações relativas às condições geomorfológicas de interesse em aplicações geotécnicas (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Esta informação pode ser aplicada em mapas gerais, temáticos ou de pormenor, cujo detalhe dependerá da escala. Contudo, os elementos topográficos e morfológicos terão de estar presentes inevitavelmente. Estes aspetos estabelecem informações importantíssimas sobre a área em estudo, nomeadamente a sua descrição física, processos ativos e zonas de potencial instabilidade, pelo que o seu estudo terá um impacto no posicionamento e delimitação de uma obra de engenharia (González de Vallejo & Ferrer, 2011).

3.3. Importância da cartografia de zonamento geotécnico e geomecânico em recursos geológicos

Para a cartografia de zonamento geotécnico ou geomecânico é necessário, em primeiro lugar, a informação geológica de base (Dearman, 1991; González de Vallejo & Ferrer, 2011). Esta informação, obtida através de estudos anteriores ou realizada de raiz através de planos topográficos já existentes e trabalho de campo, aliada a estudos de gabinete, permite delimitar zonas com características semelhantes a nível geotécnico ou geomecânico.

A cartografia de zonamento pode ser do tipo geotécnica, litológica, complexo litológico ou conjunto litológico. O quadro 29 apresenta uma breve descrição de cada uma das categorias, organizadas por ordem decrescente em termos de grau de homogeneidade litológica e física, apresentando a informação fulcral em cada uma das categorias, bem como a escala apropriada.

Quadro 29 - Classificação das unidades com vista ao mapeamento geotécnico (adaptado de UNESCO-IAEG, 1976; IAEG, 1981a,b; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Tipo de cartografia	Descrição	Escala
Geotécnica	Zonas litologicamente e petrofisicamente uniformes, caracterizadas por valores médios das propriedades geológico-geotécnicas determinadas <i>in situ</i> ou em laboratório.	Grande escala (local)
Geotécnica geral	Zonas com homogeneidade na composição, textura e estrutura das unidades litológicas. Geralmente desuniforme nas propriedades petrofísicas. É apresentada uma gama de valores invés de uma média ponderada à unidade relativamente à propriedades mecânicas.	Grande escala (local) e se possível média escala
Geológica	Conjunto de tipos litológicos formados ao mesmo tempo e em condições tectónicas semelhantes. Apresentam propriedades litológicas e físicas variáveis. São fornecidos dados sobre os tipos litológicos individuais e sobre o comportamento geral da zona.	Média escala e pequena escala (regional) quando possível
Geológica regional	Apresenta vários complexos litológicos desenvolvidos sob condições paleográficas e tectónicas semelhantes. Apresentam propriedades geotécnicas gerais.	Pequena escala (regional)

3.3.1. Cartografia de zonamento geotécnico

O zonamento do tipo geotécnico é uma divisão de zonas com base na variação dos parâmetros geológico-geotécnicos do maciço rochoso (especialmente, a heterogeneidade litológica, o grau de alteração, o grau de fraturação e a resistência), podendo, dentro de uma única zona, serem incluídas rochas de diferentes litologias e idades geológicas, permitindo ainda a divisão da zona geotécnica em uma ou mais zonas (ou até subzonas). As zonas geotécnicas são estabelecidas, especialmente, recorrendo aos parâmetros geológico-geotécnicos demonstrados na figura 33.



Figura 33 - Parâmetros geológico-geotécnicos que definem as zonas e/ou subzonas geotécnicas (ISRM, 1978, 1981).

Para além dos aspetos mencionados, os restantes parâmetros geológico-geotécnicos (ISRM, 1978, 1981) podem ser agrupados e contabilizados para a distribuição de zonas e subzonas geotécnicas. Estes dados, após recolhidos em campo, serão desenvolvidos, tratados e organizados em gabinete, permitindo uma análise estatística automatizada, ou não, permitindo desenvolver uma cartografia com base em toda a informação geológica, geotécnica e geomecânica.

3.3.2. Cartografia de zonamento geomecânico

O zonamento geomecânico foca-se nas propriedades geomecânicas do maciço rochoso através dos seus índices e classificações geomecânicas, e tem como objetivo caracterizar o terreno em termos de aptidão e comportamento geomecânico. Este processo de zonamento baseia-se no desenvolvimento dos índices e classificações geomecânicas anteriormente referidas e nas suas correlações (figura 34), resultando na delimitação de áreas onde o maciço rochoso apresenta homogeneidade no seu comportamento e propriedades mecânicas.

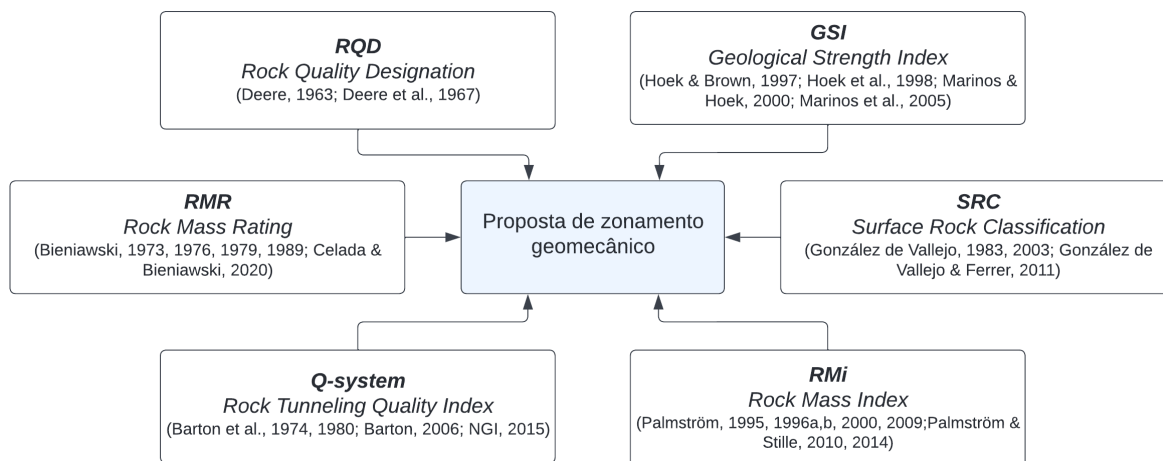


Figura 34 - Classificações geomecânicas desenvolvidas para a diferenciação de zonas geomecânicas.

As cartografias de zonamento geotécnico e geomecânico inserem-se no tipo de cartografia geotécnica, assinalada no quadro 29, visto tratar-se de um mapeamento com base na uniformidade de parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos, recomendando-se uma grande escala, ou seja, ao nível local e *in situ* (1:5 000 a 1:500).

3.3.3. Recolha de dados

As características geotécnicas dos materiais podem ser avaliadas a partir de meios diretos ou indiretos, aplicando correlações empíricas, classificações e índices geotécnicos e geomecânicos (González de Vallejo & Ferrer, 2011). A figura 35 apresenta os métodos de recolha de dados visando o mapeamento geotécnico.

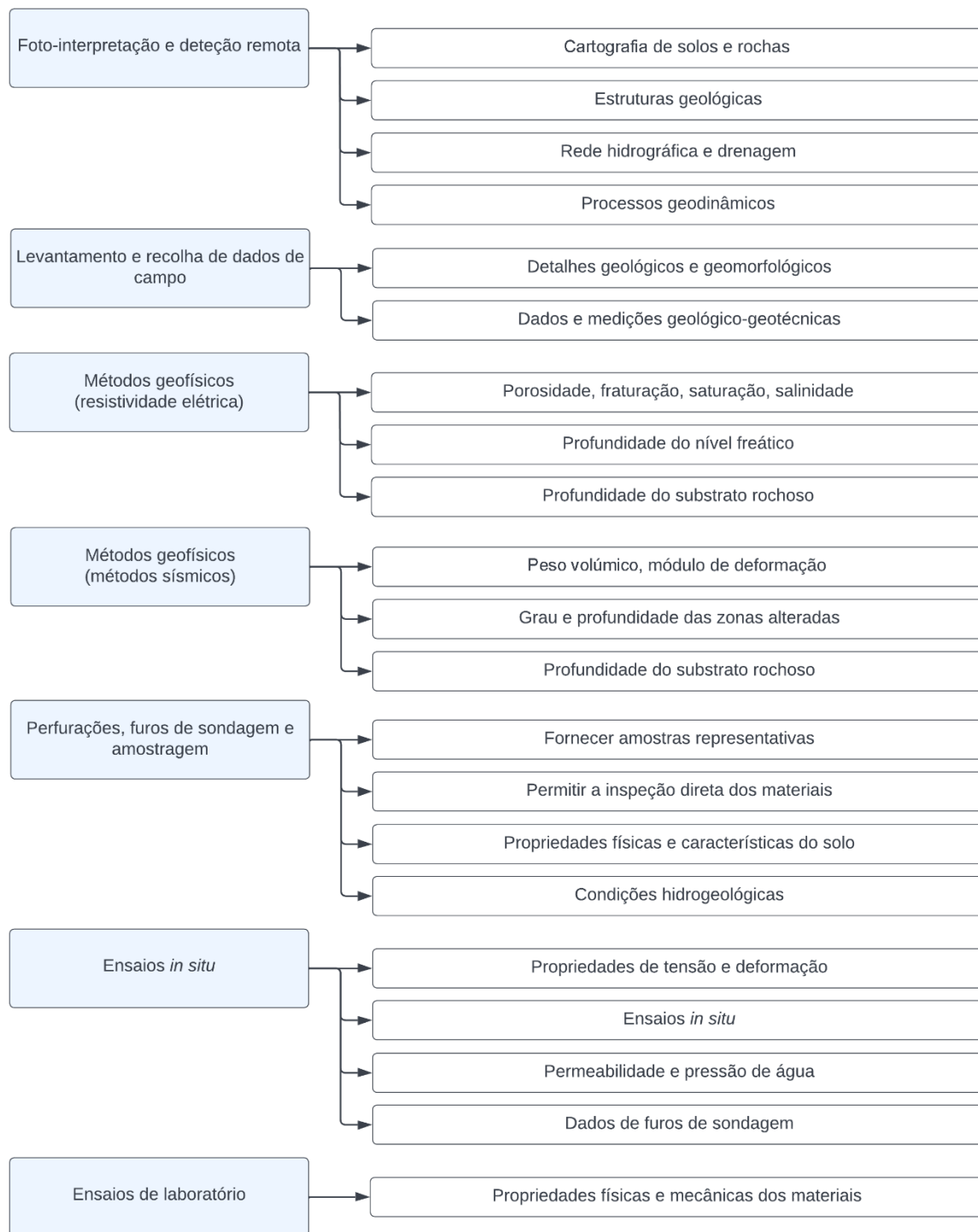


Figura 35 Métodos de recolha de dados para o mapeamento geotécnico (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

3.3.4. Demonstração de dados

Dada a existência de diferenças consideráveis entre mapas, a nível de representação de dados e como são apresentados, e devido à complexidade dos materiais geológicos, não existe um procedimento padronizado de representação dos mesmos, embora várias organizações tenham desenvolvido normas nacionais e internacionais (e.g., GSL, 1972; UNESCO-IAEG, 1976; IAEG,

1981a,b; ISRM, 2007, 2015; Griffiths, 2002), propondo símbolos e metodologias a adotar na elaboração da cartografia geotécnica. As informações relativas às características e propriedades geotécnicas dos solos e rochas devem ser demonstradas graficamente em mapas tendo em consideração o seguinte (e.g., Griffiths, 2002; Zuquette & Gandolfi, 2004; González de Vallejo & Ferrer, 2011):

- Atribuir propriedades geológico-geotécnicas e geomecânicas aos conjuntos de zonas e subzonas geotécnicas e geomecânicas;
- Divisão em unidades homogêneas de acordo com as propriedades disponíveis (e.g. resistência, peso volúmico, plasticidade, grau de fraturação e grau de alteração, entre outras);
- Atribuir valores quantitativos às zonas e subzonas geotécnicas e geomecânicas;
- Retratar a distribuição de valores quantitativos por isolinhas.

O quadro 30 apresenta os elementos básicos que devem ser representados a nível de classificação de solos e rochas, propriedades geológico-geotécnicas, condições hidrogeológicas, condições geomorfológicas e processos geodinâmicos, em relação com a sua escala (González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Quadro 30 - Representação cartográfica de elementos básicos em mapas geotécnicos (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Escala	Classificação de solos e rochas	Propriedades geológico-geotécnicas	Condições hidrogeológicas	Condições geomorfológicas	Processos dinâmicos
Pequena	Cores e molduras Letras e números	Cores e tramas	Símbolos e valores numéricos	Linhas de contorno Símbolos específicos para elementos geomorfológicos	Símbolos
Média			Contornos e linhas Valores numéricos	Linhas de contorno Limites e recursos morfológicos de detalhe	
Grande		Valores numéricos Diagramas e gráficos	Isolinhas Valores numéricos		Contornos e linhas

Finalmente, qualquer mapa deve conter uma legenda detalhada, de modo a elucidar a informação contida no mesmo. A sua consulta não deve necessitar de qualquer documento adicional de modo a interpretar a informação.

3.4. Sistemas de informação geográfica (SIG)

3.4.1. Noções básicas e componentes do SIG

A gestão de informação na vertente espacial é uma necessidade na humanidade desde as primeiras civilizações conhecidas (Bateira, 2001). Desde então e até à década de 60, do Século XX, não existia nenhum método de automatização e armazenamento de dados cartográficos. Tomlinson (1962) realizou um projeto denominado *Canadian Geographic Information System (CGIS)*. Esta conceção foi um ponto de partida para o registo numérico e digitalização de mapas, facilitando e otimizando o processo de desenvolvimento de cartografia (Zuquette & Gandolfi, 2004).

Todavia, o termo sistemas de informação geográfica tem uma grande diversidade de definições e interpretações, as quais dependem essencialmente da sua finalidade, do tipo de armazenamento de dados e da manipulação e apresentação da informação (Bateira, 2001). A publicação “*An overview and definition of GIS*”, da autoria de D. J. Maguire, no livro “*Geographical Information Systems, principles*”, apresenta onze definições do conceito SIG. Em destaque, o *DoE (Department of the Environment, 1987)*, definem SIG como “(...) um sistema para capturar, armazenar, verificar, manipular, analisar e exibir dados que estão espacialmente referenciados ao planeta Terra”. Burrough (1986), por outro lado, afirma que SIG é “(...) um poderoso conjunto de ferramentas digitais para recolher, armazenar, recuperar sem restrições, transformar e exibir dados espaciais do mundo real”. Ambas as definições supra enquadram-se no âmbito da dissertação, uma vez que uma base de dados, relativa à área abrangida pela área de estudo, será transformada e analisada, de modo a retratar as cartografias dos zonamentos geotécnico e geomecânico em duas e três dimensões.

Nesta perspetiva, poder-se-á concluir que o SIG está dividido em três componentes: a componente da base de dados geográfica (*geodatabase*), a componente da geovisualização e a componente do geoprocessamento (figura 36).



Figura 36 - As três perspetivas fundamentais do SIG (adaptado de ESRI.com, 2009a).

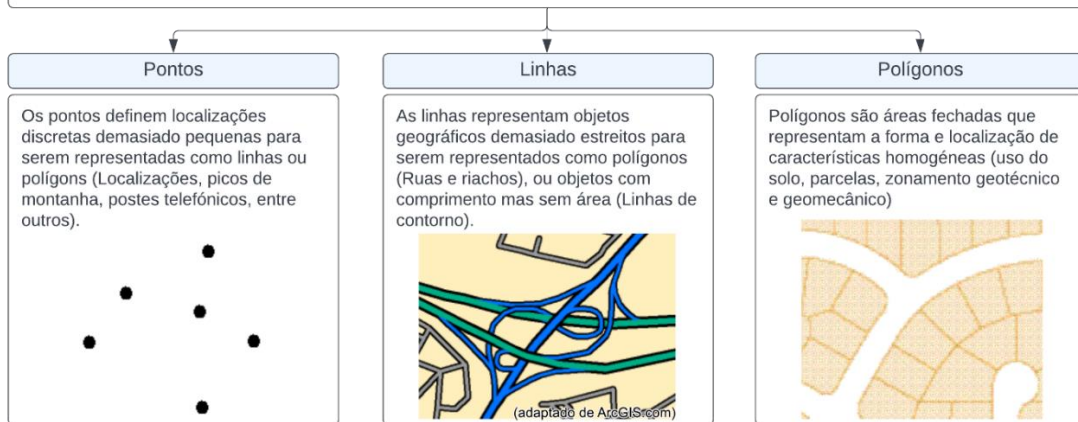
A componente analítica, ou a componente da base de dados geográfica (*geodatabase*), refere-se a todo o armazenamento, gestão e relação de dados derivadas das várias fontes (figura 36) permitindo descrever a envolvente em termos geográficos. Estes dados assemelham-se às “camadas” de um mapa, no sentido em que são referenciados geograficamente para que se sobreponham à superfície da terra, cujos pontos, linhas e polígonos partilham relações espaciais umas com as outras (ESRI.com, 2009a).

A componente tecnológica, ou do geoprocessamento, engloba todo o desenvolvimento dos dados SIG, o seu processamento, modelos e *scripts*, em meios informáticos. A partir de um conjunto de dados, aplicando funções analíticas e escrevendo os novos resultados num novo conjunto de dados, é possível atualizar e manipular informação, envolvendo a capacidade de encadear uma série de operações para que os utilizadores possam realizar análises espaciais e automatizar o processamento de dados (ESRI.com, 2009a). Esta componente tem sido alvo de grande evolução desde a década de 80, do século passado, estendendo as suas potencialidades com o acompanhamento dos avanços tecnológicos (Bateira, 2001). A componente da geovisualização abrange as características e as suas relações na superfície da Terra. As vistas cartográficas podem ser construídas e utilizadas como “janelas para a base de dados geográfica”, para apoiar a consulta, análise e edição da informação, através de mapas bidimensionais (2D) ou mapas e modelos tridimensionais (3D) (e.g., Berry, 1987; Tomlin, 1990, 1991; ESRI.com, 2009a).

Como referido, os SIG, tal como um mapa, baseiam-se na sobreposição de “camadas” (“layers”). Os seus conjuntos de dados representam uma coleção de aspetos individuais com as suas localizações geográficas e formas, assim como informação descritiva armazenada como atributos. Neste âmbito, distingue-se quatro tipos de representações geográficas (figura 37), que estão na base da gestão e interpretação da informação geográfica (ESRI.com, 2009b): características (pontos, linhas e polígonos), atributos, imagens e superfícies.

Características - Pontos, linhas e polígonos

As características geográficas são representações de elementos localizados sobre ou perto da superfície terrestre. Estas podem ocorrer naturalmente (rios e vegetação), podem ser construções (estradas, condutas, poços e edifícios) ou subdivisões de terrenos (condados, divisões políticas, uso de solo e zonamento geotécnico e geomecânico). Estas características são as mais frequentes em representações em SIG.

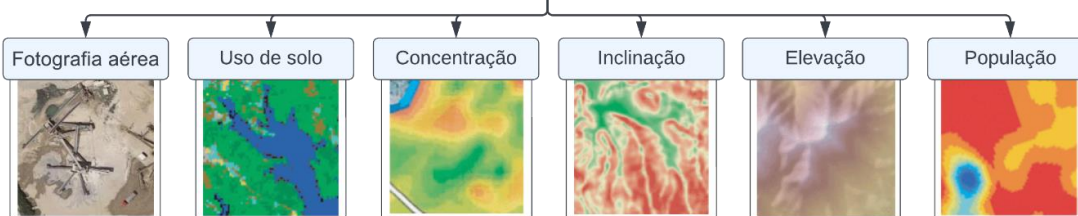


Atributos

Os mapas transmitir a informação descritiva através de símbolos, cores e etiquetas (As linhas e massas de água são representadas a azul, as estradas são exprimidas conforme a sua classe - autoestrada, IP, IC, entre outras). Num SIG, estes atributos são geridos em tabelas, que se baseiam em conceitos básicos e essenciais de bases de dados relacionais. Estas bases de dados fornecem um modelo de dados simples e universal para armazenar e trabalhar com informações de atributos.

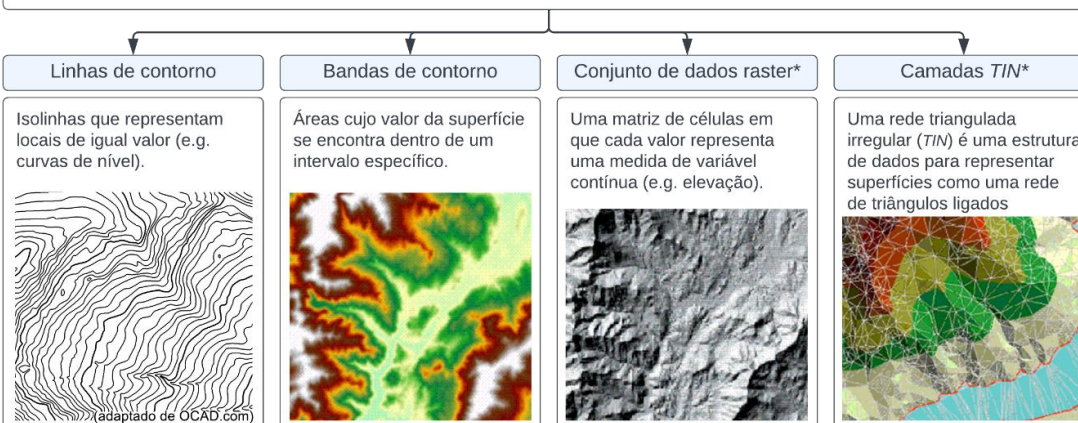
Imagens

As imagens são geridas como um tipo de dados raster, composto por células dispostas numa grelha de linhas e colunas. O sistema concede o tamanho da célula e coordenadas de referência para um conjunto de dados raster. Estas propriedades permitem que os dados sejam descritos por uma série de valores de células, que podem ser localizadas pelas suas coordenadas de referência, tamanho e número de linha e coluna. Os tipos mais comuns de imagens são:



Superfícies

Uma superfície define-se como a ocorrência de um valor para cada ponto individual da área (e.g. Mapas de elevação, mapas de precipitação, mapas de concentração de poluição - os valores variam de ponto para ponto). As superfícies podem ser representadas através de uma ou mais das seguintes opções:



* As representações raster e TIN podem ser usadas para estimar o valor em qualquer local através de interpolação

Figura 37 - Elementos de representação da informação geográfica (adaptado de ESRI.com, 2009a,b).

3.4.2. Metodologias na implementação do SIG

O primeiro passo para a construção de uma casa é o seu planeamento em desenho e em projeto, passando seguidamente à fase de edificação com uma equipa treinada e materiais adequados. A implementação de um SIG é semelhante a esse processo, onde as etapas são interdependentes, isto é, o *output* de um passo, será o *input* do seguinte. Neste âmbito, um SIG, e todas as suas operações e funções, apenas são exequíveis estabelecendo um fluxo de trabalho (figura 38), que representa a estrutura do tratamento das informações, que levará à criação de um ficheiro topológico e, conseqüentemente, questões lógicas. Este processo resume-se à identificação dos elementos gráficos e à montagem da ligação com a base de dados (Bateira, 2001).

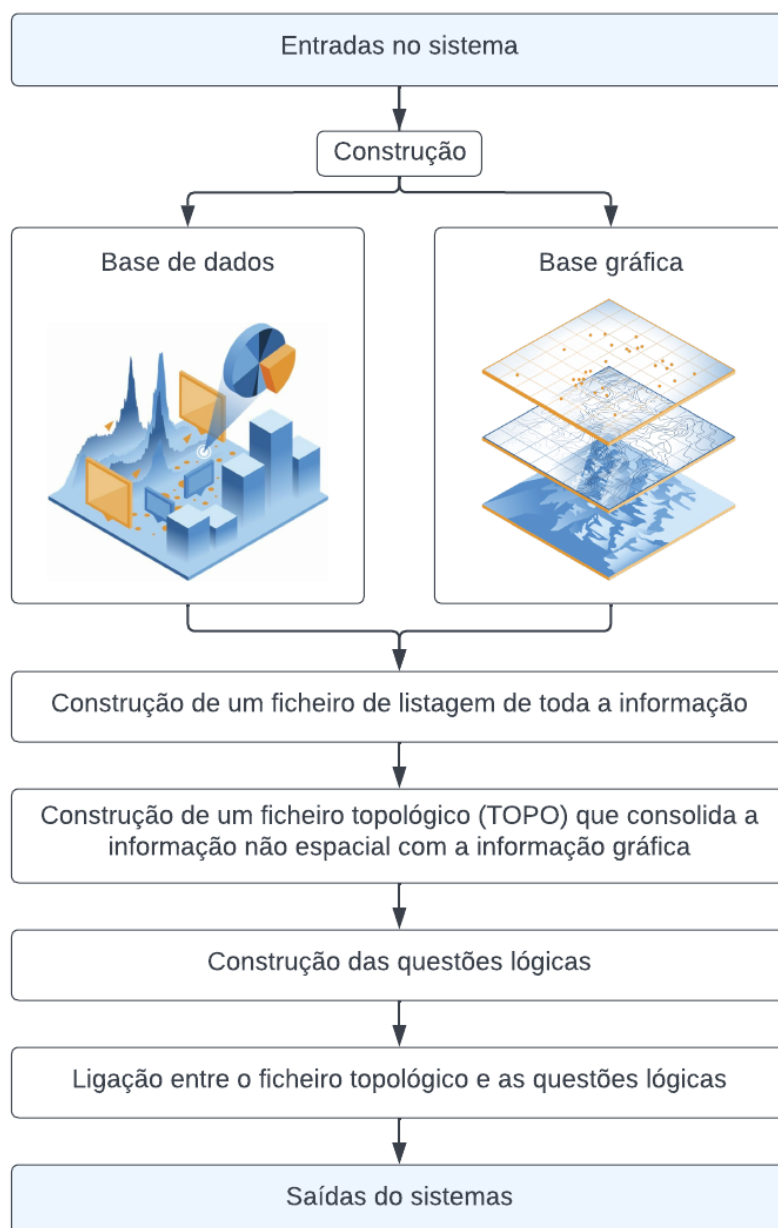


Figura 38 - Fluxo de trabalho em ambiente SIG (adaptado de Bateira, 2001). Fotografias retiradas de "Esri Introduces ArcGIS Platform" (Cardella, 2021).

Após a digitalização da base gráfica deriva a caracterização dos elementos gráficos, conferindo aos mesmos atributos na base de dados. Deste modo, adquire-se a base informativa que possibilita listar toda a informação, elaborar um ficheiro topológico correlacionado com as questões lógicas, exibindo a informação que integra as saídas do sistema (Bateira, 2001).

3.4.3. Sistemas de base de dados e modelos de dados em geotecnia

A conceção tradicional da base de dados relacional engloba três fases básicas, o modelo conceptual (Pinho, 2010; Santos, 2013), a articulação de um modelo de dados lógico e a implementação física da base de dados (Zeiler & Murphy, 2010).

O modelo conceptual de dados é a primeira etapa de um projeto, onde a modelação é alusiva à visão do observador, ou seja, trata-se de um esquema representado graficamente, pouco detalhado (Santos, 2013), permitindo gerar entidades e suas correlações e atributos (Pinho, 2010).

O modelo lógico de dados resume-se na definição precisa do conjunto de objetos de interesse e identificar as relações entre eles (Zeiler & Murphy, 2010). O seu objetivo é explicar a informação contida na base de dados, reconhecer as relações entre as entidades a partir dos seus atributos, melhorar a compreensão do sistema a desenvolver e detalhar o comportamento e estrutura do mesmo, demonstrar as decisões tomadas, e desenvolver um diagrama da informação (Pinho, 2010; Santos, 2013).

Do modelo lógico de dados resulta o modelo físico da base de dados (Zeiler & Murphy, 2010). Este servirá para descrever mais detalhadamente o grau de implementação da base de dados, assim como a organização das entidades e o método de acesso (Pinho, 2010; Santos, 2013).

A base de dados geográfica trata-se assim de “uma coleção de dados geográficos de vários tipos armazenados numa pasta comum do sistema de ficheiros, uma base de dados *Ms. Access*, ou um SGBD multi-utilizador” (ESRI.com, 2009a; Pinho, 2010), e são classificados em três classes, tal como se poderá observar na figura 39.

O modelo mais recorrido na atualidade é o relacional, uma vez que apresenta múltiplas vantagens em comparação com o modelo em rede e hierárquico, visto que é mais flexível, não exige hierarquia, a procura de dados pode ser realizada em qualquer tabela, utilizando qualquer atributo, os campos podem ser usados como chave, as tabelas são geradas conforme as necessidades e permite otimizar o desempenho do sistema (e.g., Arctur & Zeiler, 2004; Zuquete & Gandolfi, 2004; Zeiler & Murphy, 2010). Por outro lado, trata-se de um modelo com desempenho algo lento nas operações de buscas sequenciais de dados (Pinho, 2010).

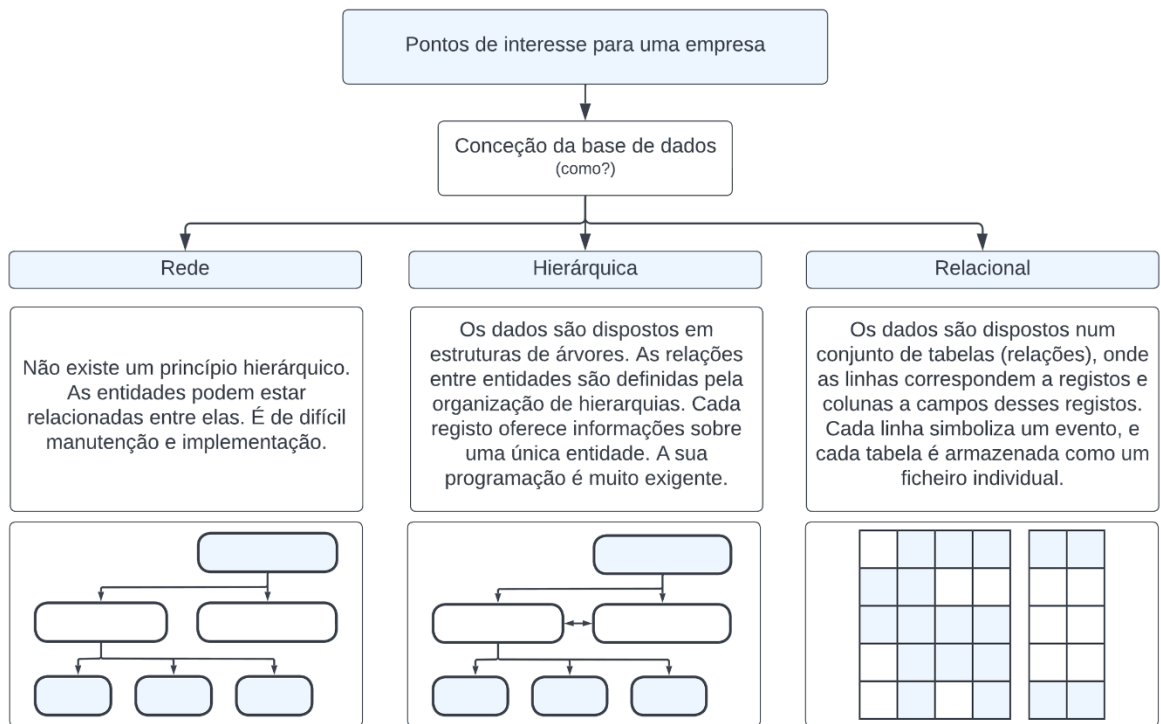


Figura 39 - Processo convencional para a conceção de uma base de dados (adaptado de Chen, 1977; Pinho, 2010).

(página propositadamente em branco)

Capítulo IV

Caso de estudo: Geotecnia e geomecânica da exploração do Poço Negro (Penafiel) para a criação de uma cartografia geotécnica do recurso pétreo

Caso de estudo: Geotecnia e geomecânica da exploração do Poço Negro (Penafiel) para a criação de uma cartografia geotécnica do recurso pétreo

4.1. Pedreira do Poço Negro: enquadramentos regional e local

4.2. Pedreira do Poço Negro: aspetos legais da exploração e constrangimentos ambientais

4.3. Cartografia e modelação 3D da Pedreira do Poço Negro

4.4. Investigações sobre a compartimentação do maciço rochoso do Poço Negro

4.5. Blocometria e qualidade do maciço rochoso do Poço Negro

4.6. Estudo geomecânico do maciço rochoso do Poço Negro

4.7. Avaliação do grau de compartimentação do maciço rochoso: implicações na gestão racional do georrecurso

(página propositadamente em branco)

4. Caso de estudo: Geotecnia e geomecânica da exploração do Poço Negro (Penafiel) para a criação de uma cartografia geotécnica do recurso pétreo

4.1. Pedreira do Poço Negro: enquadramentos regional e local

4.1.1. Enquadramento Geográfico

A Pedreira do Poço Negro, pertencente à empresa BRITAFIEL – Agregados e Ornamentais, S.A., tem como principais atividades a extração e transformação de agregados e rochas ornamentais de natureza granítica (figura 40).



Figura 40 - A) Exemplo da técnica da amostragem linear (Scanline – SC01); B) Perspetiva da transição da exploração de rocha ornamental e agregados (NE); C) Vista da exploração de rocha ornamental (NW); D) Panorama da exploração de agregados (SC04, SC05, SC06 e SC07); E) Vista aérea do sul da Pedreira do Poço Negro (maio de 2022).

O centro de exploração localiza-se na freguesia de Duas Igrejas, no concelho de Penafiel, localizado no distrito do Porto (figura 41).

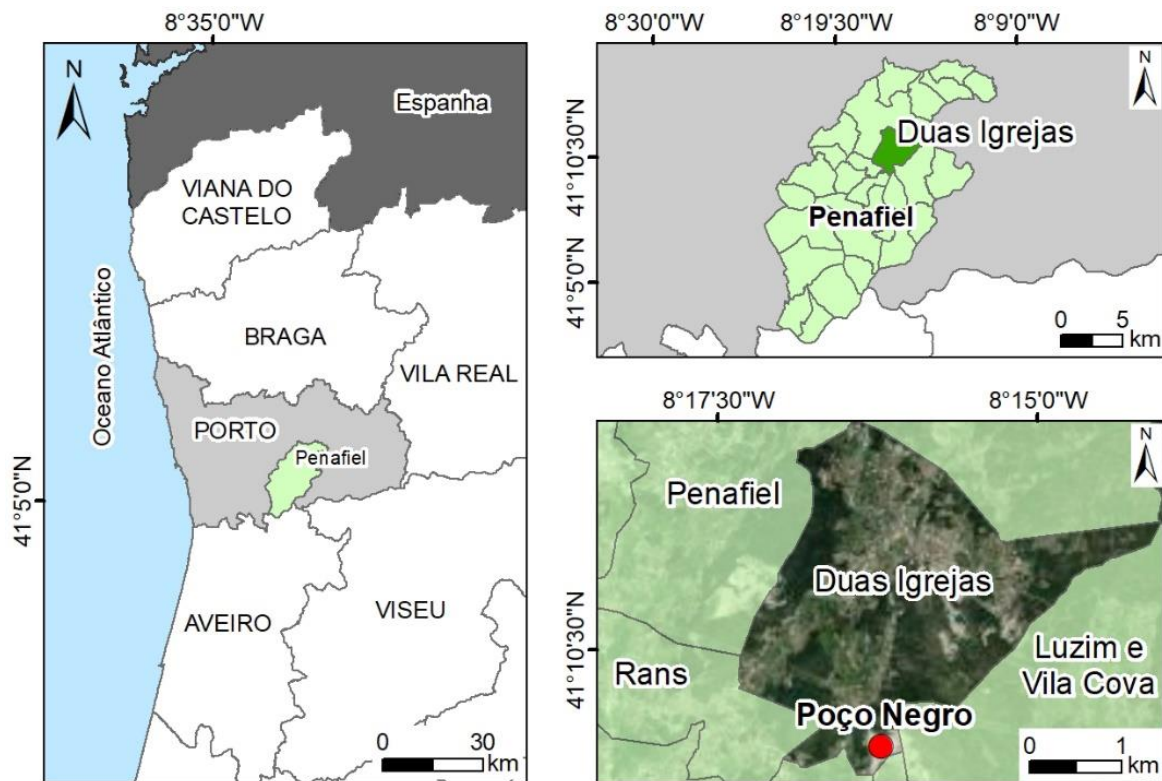
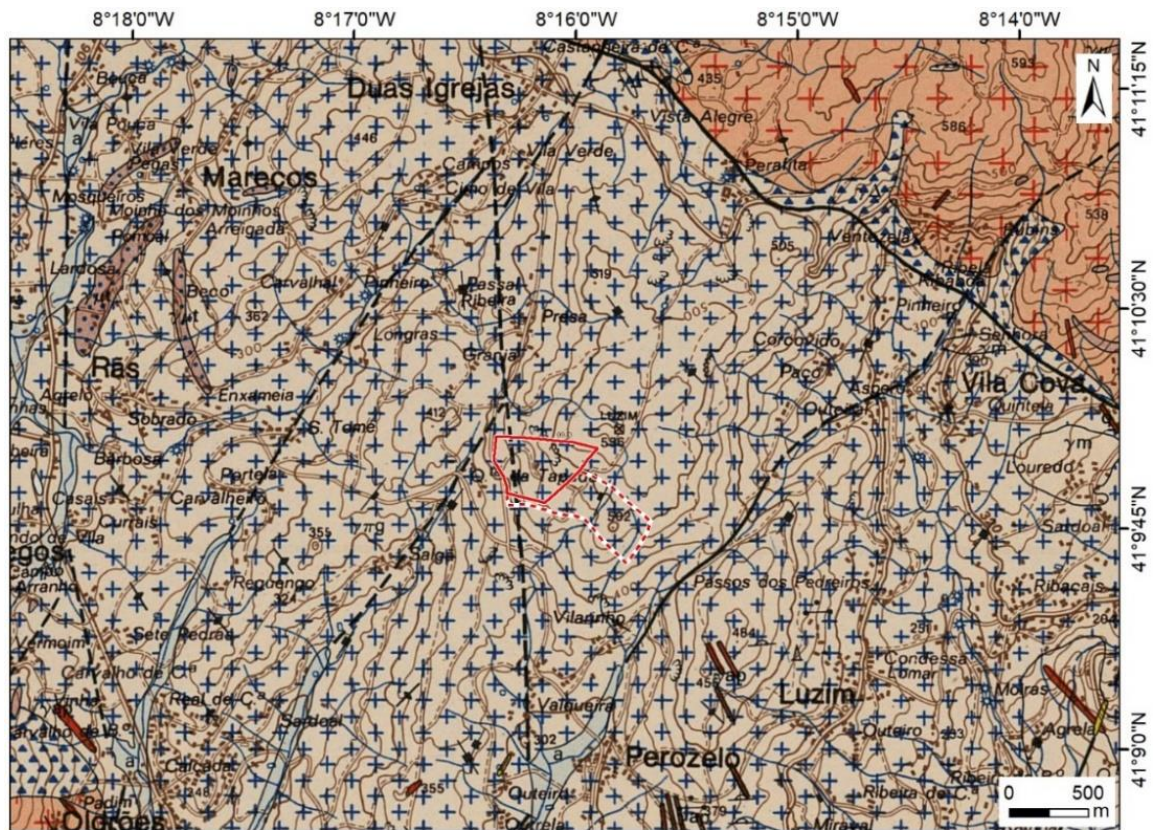


Figura 41 - Enquadramento geográfico da pedreira de Poço Negro, Duas Igrejas, Penafiel (NW de Portugal). A Pedreira do Poço Negro avizinha as freguesias de Presa, a norte, Portela, a oeste, Perozelo a sul e Luzim a sudoeste.

A freguesia de Duas Igrejas apresenta uma área aproximada de 8,1 km² (C.M. Penafiel), uma população residente de 2 255 (2021), transcrevendo para uma densidade populacional de 278,4 hab/km² (INE, 2021). O concelho de Penafiel, capital da subregião do Tâmega com uma área aproximada de 212,2 km² (C.M. Penafiel), conta com 69 630 habitantes (2021), traduzindo para uma densidade populacional de 328,1 hab/km² (INE, 2021).

4.1.2. Enquadramento geológico

O maciço de Penafiel é um granito monzonítico porfiróide de duas micas, essencialmente biotítico, como observado na figura 42 (Medeiros et al., 1981a,b; Pereira et al., 1989), pertencendo a uma faixa de granitóides Variscos, com uma orientação geral NW – SE, estendendo desde o Alto Minho até às Beiras, inseridos na Zona Centro-Ibérica (ZCI) do Maciço Ibérico (Pereira et al., 1989; Dias et al., 2000).



Adaptado de Medeiros et al. 1981, Carta Geológica de Portugal, folha 9D, 1:50 000

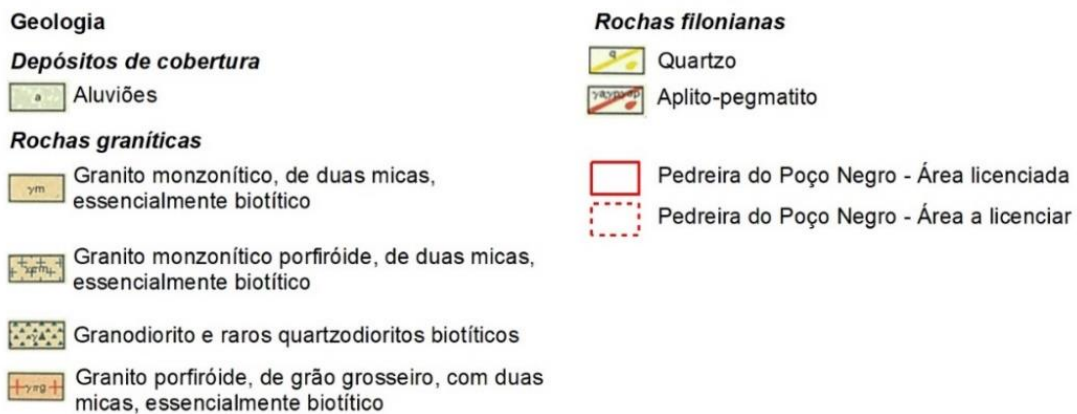


Figura 42 - Enquadramento geológico regional do centro de exploração do Poço Negro (adaptado de Medeiros et al., 1981b).

A rocha apresenta, a um nível macroscópico, grão médio a fino uniforme, leucocrata acinzentado. Na sua matriz, segundo Medeiros et al. (1981a), distingue-se quartzo, plagioclase, microclina, biotite e moscovite (figura 43). É possível ocasionalmente observar, na zona norte da pedreira, filões e filonetes de quartzo ou de feldspato.



Figura 43 - Composição da matriz rochosa: quartzo, plagioclase, biotite e moscovite. Na esquerda da amostra observa-se xenólito.

No documento do “Plano de Pedreira BRITAFIEL” destaca-se que na área da pedreira ocorrem granitos com diferentes tipos de alteração, traduzindo nas designações comerciais do produto, ou seja, o granito amarelo e o granito azul. Aquando da ocorrência da superfície de alteração do granito azul, este apresenta uma fina patine de material de cor escura, passando a material granítico pouco alterado. A capa de alteração do granito amarelo apresenta também uma camada fina de material orgânico, passando para um granito medianamente alterado. Os terrenos não explorados e envolventes apresentam uma disposição, por vezes caótica, de bolas graníticas, consequência de uma disjunção esferoidal, sob uma densa camada de vegetação rasteira.

4.1.3. Enquadramento morfotectónico e hidrológico

O relevo da região é condicionado e dominado pelo substrato rochoso de natureza granítica, formando relevos acentuados de encostas íngremes intercaladas em vales destacados. A área total da pedreira apresenta um relevo moderado a acentuado, cujas cotas mais elevadas atingem os 540 metros, na zona NE, próximo do vértice geodésico de Luzim, e as cotas mais baixas próximas dos 400 metros. O local de estudo apresenta um conjunto de falhas regionais prováveis com duas orientações dominantes, NE – SW e NW – SE (Medeiros et al., 1981a,b).

Segundo o documento “Plano de Pedreira BRITAFIEL” existem quatro linhas de águas na área da pedreira ainda a licenciar, que se dirigem às ribeiras de Matos e da Lage, afluentes da margem direita do rio Tâmega, acompanhando as direções correspondentes a estruturas de maior fraqueza do substrato rochoso. Estas linhas de água estão assinaladas na carta militar (IGeoE, 2012), mas não estão presentes na REN (C.M. Penafiel) nem são visíveis na pedreira, concluindo que se tratam de linhas de água temporárias.

4.1.4. Enquadramento hidroclimatológico

As perturbações atmosféricas de Oeste, juntamente com os fluxos marítimos condicionam as características pluviométrica do distrito do Porto (Velhas, 1991; Monteiro, 1997), enquadrando-se, em termos bioclimáticos, como tipo Atlântico. O relevo é também um fator responsável pela distribuição da precipitação, comparando volumes pluviométricos de estações meteorológicas a diferentes cotas (Monteiro, 1997).

Segundo a classificação climática *Köppen-Geiger*, a área da Pedreira do Poço Negro enquadra-se na categoria C_{sb} , que se caracteriza pela temperatura do mês mais quente ser superior a $10^{\circ} C$, e do mês mais frio entre 0° e $18^{\circ} C$. A precipitação ocorre maioritariamente nos meses de inverno, e a temperatura do mês mais quente é inferior a $22^{\circ} C$. Esta categoria resume-se a um clima temperado, com um inverno chuvoso, e um verão longo, seco e pouco quente (Peel et al., 2007). A época de verão no hemisfério norte começa em finais de junho e estende-se até finais de setembro.

De acordo com os dados disponibilizados pela estação meteorológica de Luzim, a cerca de 2.700 km da Pedreira do Poço Negro, e com dados meteorológico compilados desde 1991 disponibilizados pela *climate-data*, foi possível gerar a figura 44, que demonstra informações relativas às temperaturas máximas, médias e mínimas registadas em Penafiel, humidade média mensal, precipitação média mensal e anual, média de dias de chuva em cada mês e horas médias de luz solar (<https://en.climate-data.org/>, consultado a 13 de junho, 2022).

É possível concluir, a partir da figura 44, que a temperatura média diária é de $13,9^{\circ} C$, onde, durante o ano, as temperaturas médias mensais variam em $13,8^{\circ} C$. O mês mais quente é agosto, com uma temperatura média de $21,2^{\circ} C$, enquanto janeiro tem a temperatura média mais baixa de todo ano, de $7,4^{\circ} C$.

A precipitação anual média é de 1428 mm, cuja diferença entre o mês mais seco e o mês mais húmido é de 156 mm. O mês mais seco é julho, com uma precipitação média de 32 mm e, por outro lado, outubro é considerado o mês com maior queda de chuva, com uma precipitação média de 188 mm.

O mês com maior humidade relativa é janeiro, com 84,16%, e o mês com menor humidade relativa é agosto, com 64,28%. O mês mais chuvoso é novembro, com um número médio de dias de chuva de 10, e os meses menos chuvosos é julho e agosto, ambos com 4 dias de chuva. Finalmente, agosto é considerado o mês com maior número de horas médias de luz solar, com 9,8 horas, e janeiro é o mês com menor incidência solar, com um número médio de 4,7 horas de sol.

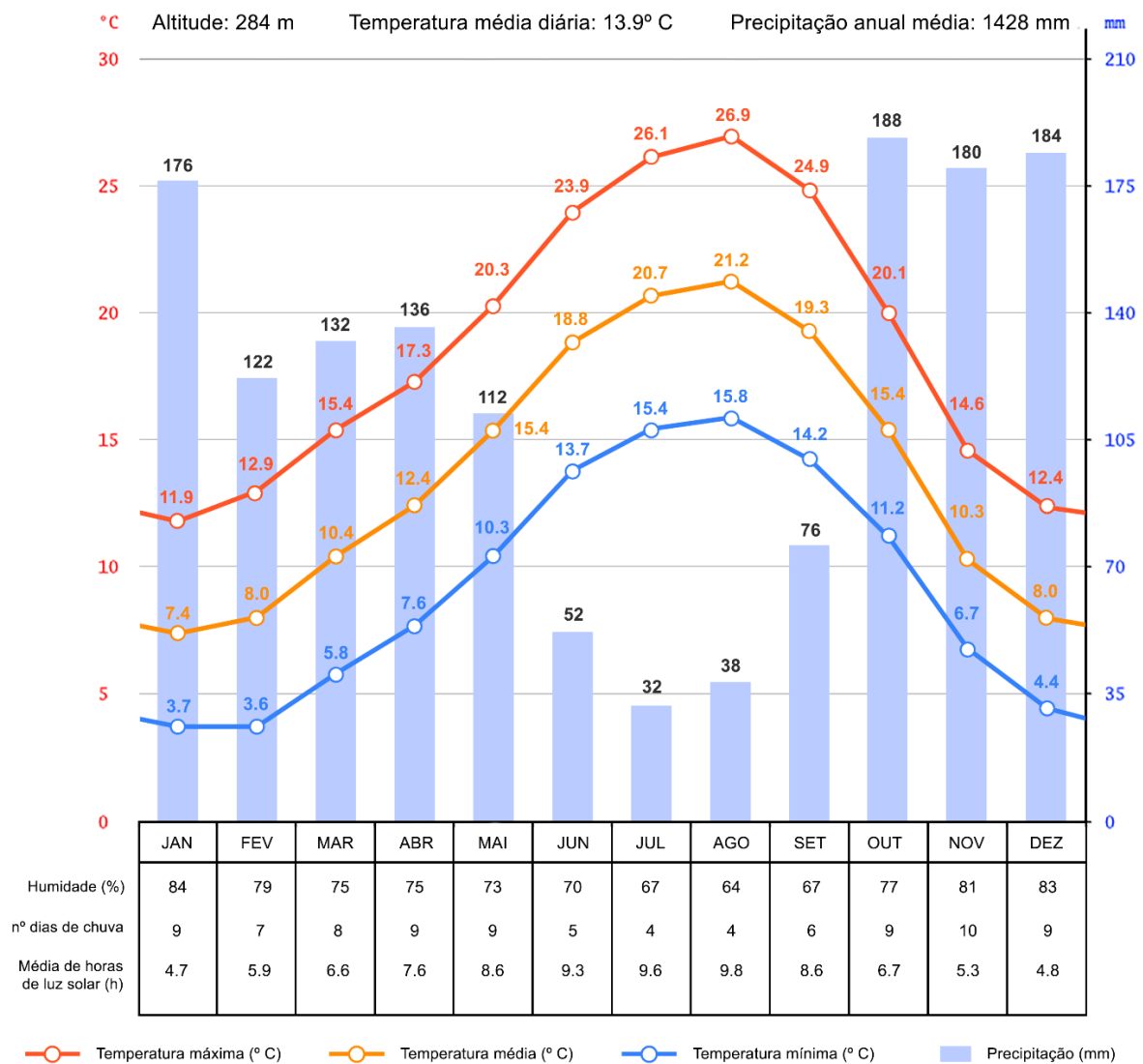
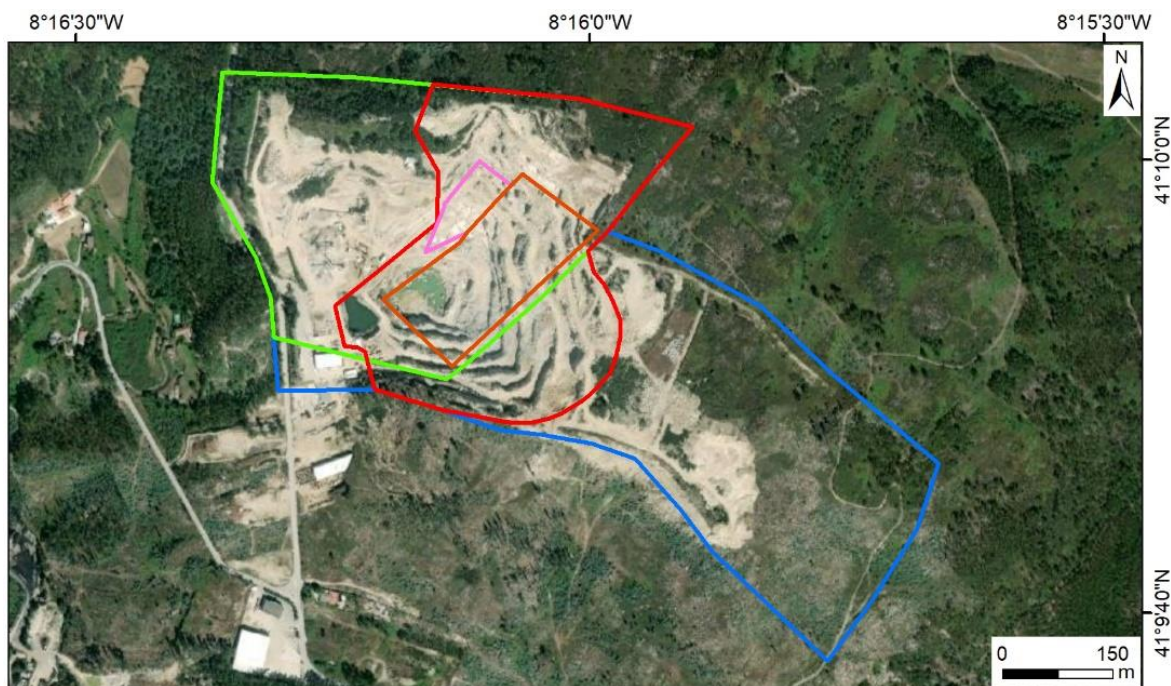


Figura 44 - Informações relativas à temperatura máxima, média e mínima (°C), precipitação média (mm), humidade (%), dias de chuva (dados analisados entre 1991 e 2021) e média de horas de luz solar (dados analisados entre 1999 e 2019) (adaptado de <https://en.climate-data.org/>, consultado a 13 de junho, 2022).

4.2. Pedreira do Poço Negro: aspetos legais da exploração e constrangimentos ambientais

A Pedreira do Poço Negro é uma fusão de três pedreiras já licenciadas a Pedreira do Poço Negro n.º 3, a Pedreira do Poço Negro n.º 4 e a Pedreira do Vilar n.º 5, com uma área total de 161 182 m². É pretendido expandir a área da pedreira por 163 023 m² para SE, totalizando numa área de 324 205 m², no momento de licenciamento, com uma área de exploração total de 112 818 m² (figura 45).



Áreas de exploração

Licenciada

- Poço Negro nº 4 - 30 000 m²
- Poço Negro nº 3 - 161 182 m²
- Vilar nº 5 - 4 900 m²

Proposta

- Área total a licenciar - 324 205 m²
- Área de exploração - 112 818 m²

Figura 45 - Ortofotomapa com a área licenciada e a licenciar da pedreira do Poço Negro (áreas transpostas do documento “Plano de Pedreira BRITAFIEL”).

Como referido anteriormente, a instalação produz rocha ornamental e agregados para fins de construção civil e obras públicas. Os produtos finais (agregados) são: i) *Tout-venant*; ii) Rachão; iii) Gravilhas; iv) Britas; v) Pó mineral.

A nível de granito ornamental, são extraídos blocos de granito azul na zona da Pedreira do Vilar n.º 5, a rosa (Figura 45) e blocos de granito amarelo na zona da Pedreira do Poço Negro n.º 4, a amarelo (Figura 45), derivado da alteração. O método de extração desenvolve-se a céu aberto, consistindo na utilização de pequenas quantidades de pólvora e explosivos, e, se necessário, fio diamantado. São efetuados furos perpendiculares entre si no mesmo plano, de modo a gerar uma separação unidirecional entre o maciço rochoso e a bancada a desmontar. Os escombros que não apresentam as aptidões necessárias como ornamental, são conduzidos para a produção de agregados (Plano de Pedreira BRITAFIEL).

Analisando a carta de ordenamento, demonstrada na figura 46, é possível concluir que parte da área já licenciada da pedreira situa-se numa estrutura ecológica ou espaço florestal, “área florestal de produção”, a NW, e “área florestal de proteção”, a NE. A restante área da pedreira já licenciada está localizada num espaço para indústria extrativa, mais concretamente numa “área de exploração

consolidada/complementar”. A área de expansão da pedra localiza-se, na sua totalidade, na zona caracterizada como “área de exploração consolidada/complementar”, pertencente à categoria de “espaço para indústria extrativa” (C.M. Penafiel).

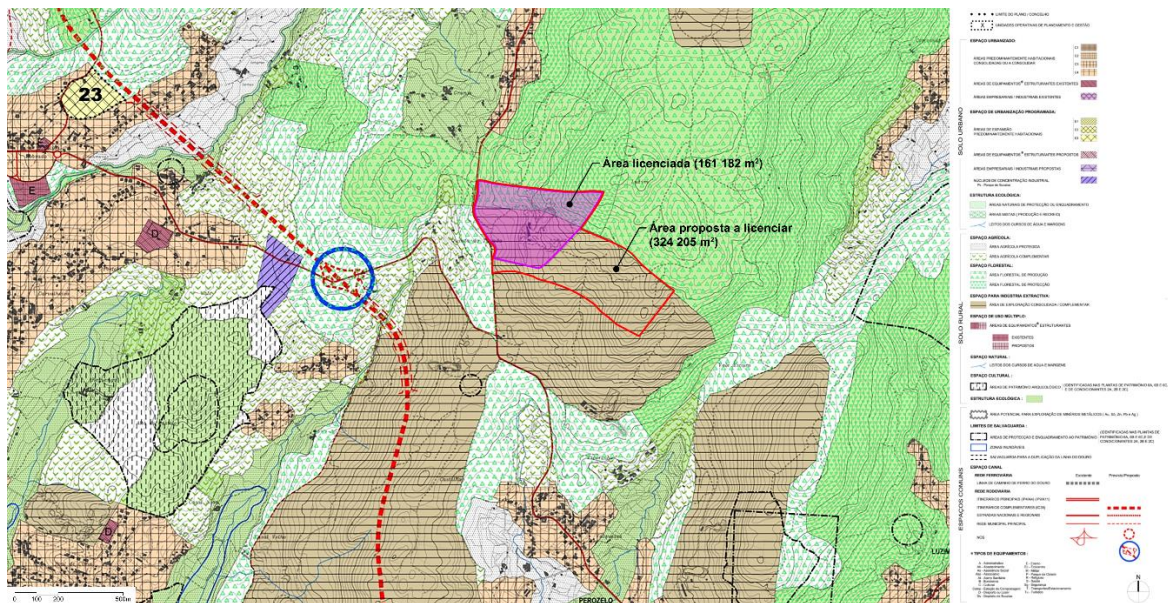


Figura 46 - Localização da área da pedra já licenciada e a licenciar na planta de ordenamento de território (adaptado de C.M. Penafiel).

De acordo com a carta de condicionantes (figura 47), conclui-se que a área já licenciada da pedra se encontra sobre a reserva ecológica nacional (REN). A restante área da pedra licenciada e a licenciar não apresenta quaisquer condicionantes.

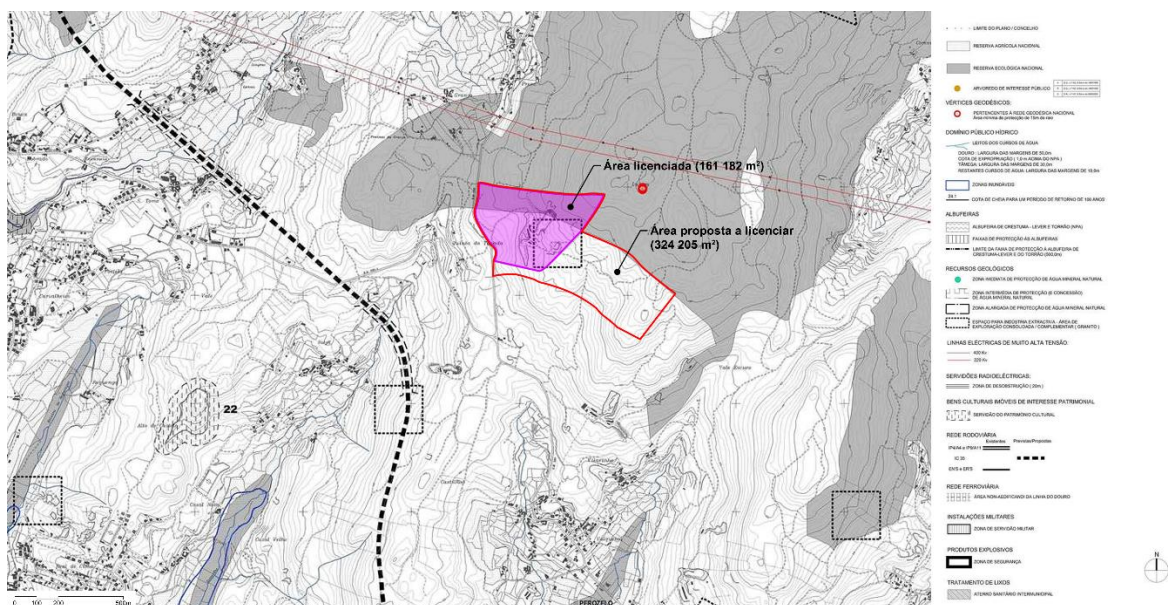


Figura 47 - Localização da área da pedra já licenciada e a licenciar na planta de condicionantes de território (adaptado de C.M. Penafiel).

Finalmente, na figura 48, está representada a área da pedreira na Carta de Uso e Ocupação do Solo (Direção-Geral do Território, 2018), onde se constata que a área licenciada da pedreira se trata de uma zona de extração de agregados.

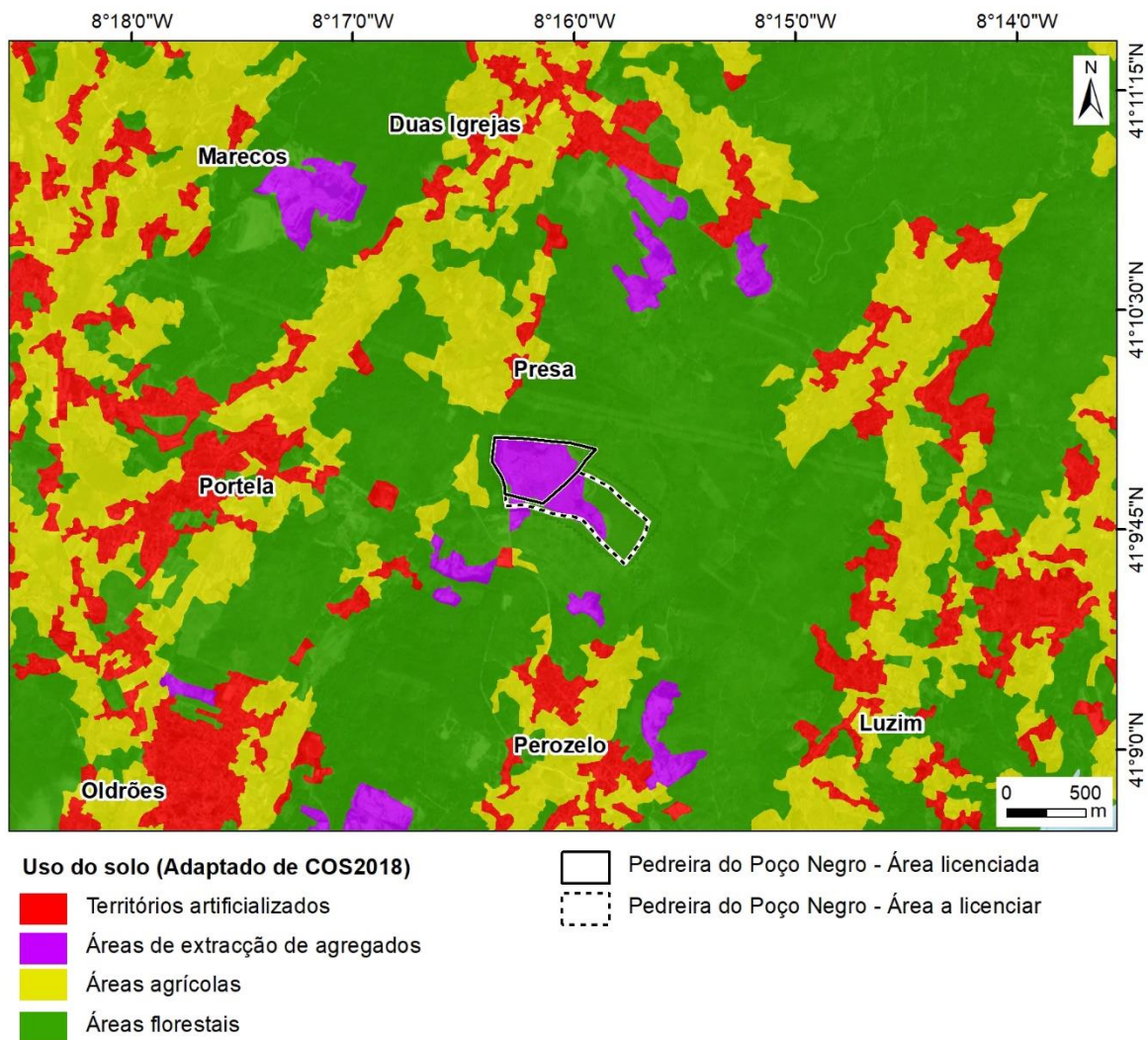


Figura 48 - Localização da área da pedreira já licenciada e a licenciar na Carta de Uso e Ocupação do Solo (adaptado de Direção-Geral do Território, 2018).

4.3. Cartografia e modelação 3D da Pedreira do Poço Negro

Os elementos cartográficos que serão apresentados serão a base do desenvolvimento da cartografia e modelação do zonamento geotécnico e geomecânico. A figura 49 representa uma perspetiva aérea da área licenciada da Pedreira do Poço Negro.



Figura 49 – Ortofoto de pormenor para o desenvolvimento dos mapas de zonamentos geotécnico e geomecânico (março 2022). Foto aérea gentilmente cedida por BRITAFIEL, S.A..

O modelo a três dimensões da área licenciada e ainda a licenciar encontra-se representado, com duas perspetivas distintas, na figura 50.



Figura 50 - Modelação em 3D da Pedreira do Poço Negro com: A) vista à exploração de rocha ornamental, a norte; B) perspetiva do sul da pedreira, das zonas de exploração de agregados (março de 2022).

4.4. Investigações sobre a compartimentação do maciço rochoso do Poço Negro

"The cornerstone of any practical rock mechanics analysis or rock engineering is the geological data base upon which the definition of rock types, structural discontinuities and material properties is based. Even the most sophisticated analysis can become a meaningless exercise if the geological information upon which it is based is inadequate or inaccurate"

Evert Hoek (1986)

O estudo da compartimentação do maciço rochoso da Pedreira do Poço Negro teve como ponto de partida a aplicação da técnica da amostragem linear (ou "scanlines" – SC) em cinco patamares distintos da pedreira de forma a definir áreas amostrais (espaciais e profundidade) representativas da exploração pétrea, ou seja, no setor onde se desenvolve a extração para rocha ornamental e o setor dos agregados (Figura 51). Na definição dos painéis amostrais foram ainda tidos os potenciais constrangimentos impostos pelo trabalho diário ou questões de segurança.

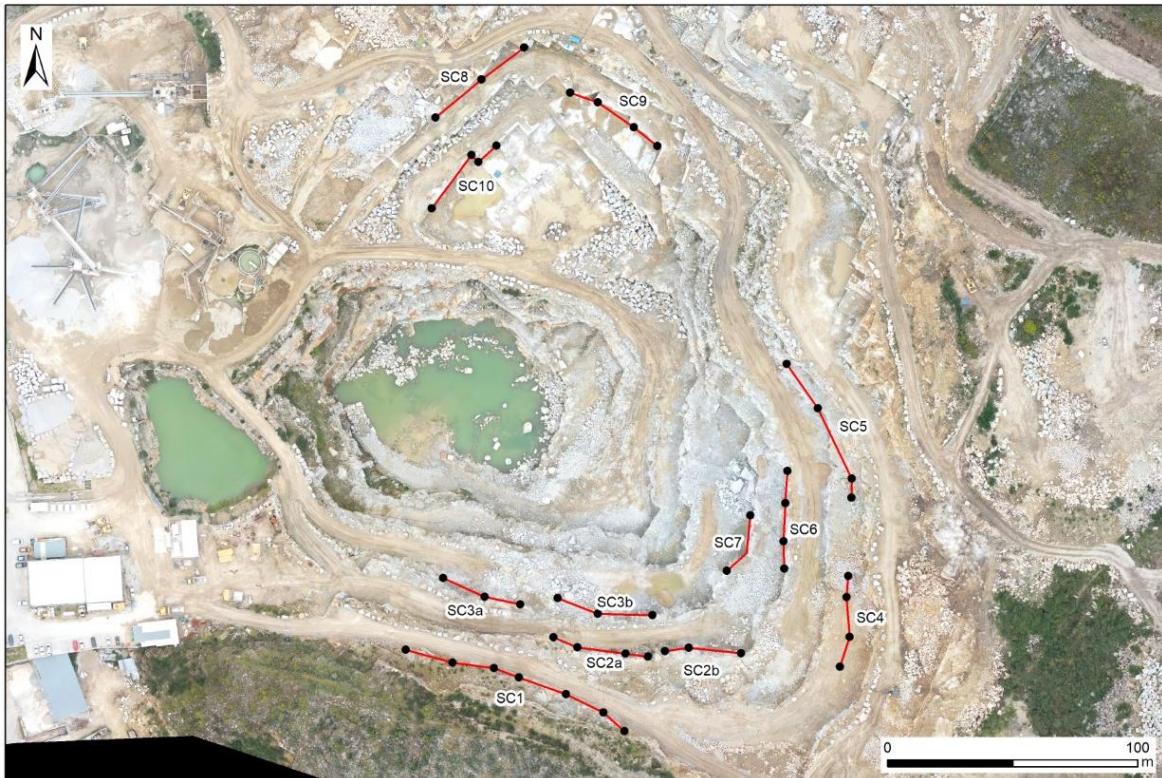


Figura 51 - Localização das diferentes Scanlines aplicadas para o levantamento dos parâmetros geológico-geotécnicos (março de 2022).

O quadro 31 apresenta as principais características das *scanlines* estudadas, a nível da sua direção, altura da fita métrica, comprimento estudado, patamar da pedreira e número total de discontinuidades e estações geomecânicas analisadas.

Quadro 31 - Características das diferentes “scanlines” (SC) realizadas.

Scanline	Direção da scanline	Altura da fita métrica	Extensão	N.º de descontinuidades	N.º de estações geomecânicas	Patamar
SC01	N 101° E	1,2 a 1,3 m	99,00 m	175	34	1
SC02	A N 104° E	1,2 m	39,50 m	49	17	0
	B N 87° E	1,2 m	34,40 m	71	12	0
SC03	A N 130° E	1,2 m	35,57 m	86	13	-1
	B N 130° E	1,2 m	39,40 m	60	14	-1
SC04	N 20° E	1,0 m	41,10 m	54	15	2
SC05	N 170° E	1,2 m	47,94 m	75	18	2
SC06	N 167° E	1,3 m	39,70 m	74	14	0
SC07	N 54° E	1,3 m	26,10 m	58	10	-1
SC08	N 232° E	1,2 m	49,00 m	24	14	0
SC09	N 308° E	1,5 m	40,70 m	29	15	-1
SC10	N 234° E	1,3 m	39,00 m	50	14	-2
Total			531,41 m	805	190	-

Foram realizadas um total de 10 *scanlines*, onde a SC02 e SC03 foram divididas em dois troços distintos, perfazendo 531,41 metros analisados. Resultando num total de 805 descontinuidades analisadas, e 190 estações geomecânicas (ensaios de Martelo de *Schmidt*), os dados recolhidos foram alvo de um minucioso tratamento estatístico, com o intuito de facilitar a verificação da compartimentação do maciço rochoso. O estudo dos parâmetros consistiu na definição de um ponto inicial de onde se iniciam todas as *scanlines*, registando as distâncias entre elas e a esta origem. A distância à origem das diferentes *scanlines*, e o espaçamento entre elas pode ser verificado através da figura 52.

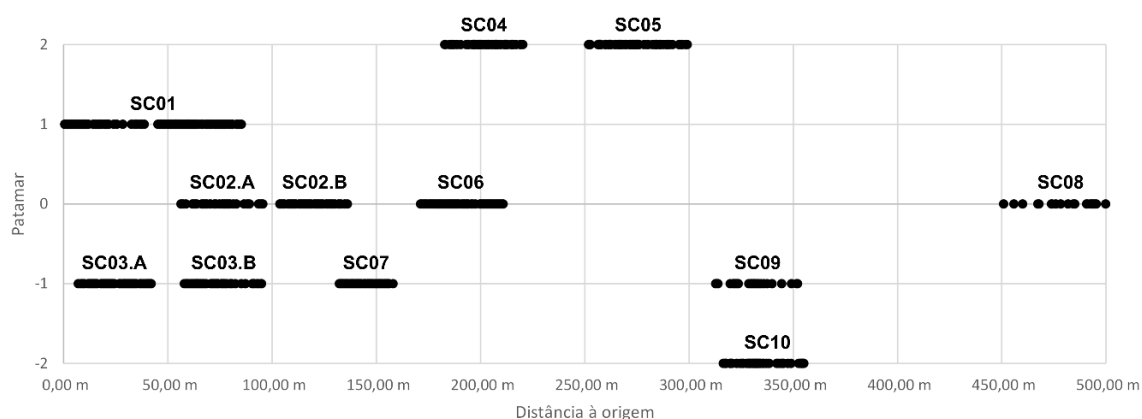


Figura 52 - Organização das scanlines quanto ao patamar onde foram realizadas e a distância à origem determinada.

De acordo com a figura 52, é possível afirmar que, de aproximadamente 500 metros lineares analisados em toda a pedreira, cerca de 90 metros não foram atribuídos a uma *scanline*. A distância entre as *scanlines* e outras possíveis interrupções não são contabilizadas para a determinação do *Fracture Intercept (F)*, ou espaçamento (ISRM, 1978, 1981), cujo valor é considerado de 0 metros.

4.4.1. Parâmetros geológico-geotécnicos: apresentação e discussão

A execução da técnica da amostragem linear, com o recorrente apontamento dos parâmetros geológico-geotécnicos das discontinuidades, de acordo com as propostas da ISRM (1978, 1981), GSL (1995) e CFCFF (1996), permitiu armazenar estes dados na aplicação *SCANGEO-DATA/BGD* v3.0, proporcionando uma análise estatística detalhada da generalidade dos dados, por zona geotécnica, e por família de discontinuidade. O quadro 32 apresenta uma síntese de todos os parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos analisados numericamente e graficamente.

Conclui-se, analisando o quadro 32, que, aproximadamente 99,4% da litologia cartografada é granito, com 800 ocorrências, registrando duas estruturas filonianas compostas por quartzo ($\approx 0,2\%$), e três por pegmatito ($\approx 0,4\%$).

A nível de discontinuidades, foram registadas 199 falhas ($\approx 24,7\%$), 601 diáclases ($\approx 74,7\%$) e 5 estruturas filonianas ($\approx 0,6\%$), compostas por quartzo e feldspato, como supramencionado.

A análise das atitudes permitiu definir quatro famílias de discontinuidades sub-verticais, e duas famílias sub-horizontais. A famílias de discontinuidades sub-verticais, cujos intervalos de direção e inclinação se encontram definidos no quadro 32, incluem 504 discontinuidades ($\approx 62,6\%$). Embora tenham sido registadas 147 discontinuidades sub-horizontais ($\approx 18,3\%$), apenas 90 ($\approx 11,2\%$) foram consideradas para as duas famílias definidas, condicionadas pelos quadrantes de inclinação dominantes, de SE e SW, totalizando em 594 discontinuidades pertencentes a uma família. Desta forma, considerando as discontinuidades cujos intervalos de direção e inclinação não se enquadram e nenhum dos definidos para as diferentes famílias, conclui-se que 211 ($\approx 26,2\%$) serão encaradas como aleatórias.

O espaçamento médio e mediano entre discontinuidades é de aproximadamente 58,1 cm e 35,0 cm, respetivamente. O desvio padrão, por outro lado, é sensivelmente 79,5 cm. Desta forma, e de acordo com as propostas da ISRM (1978, 1981), foram registados os cinco diferentes graus de fraturação, cuja maioria é de F_3 (descontinuidades medianamente afastadas), com 292 ocorrências ($\approx 36,3\%$), seguido de discontinuidades afastadas (F_2), com 208 registos ($\approx 25,8\%$), e finalmente discontinuidades próximas (F_4), com 176 anotações ($\approx 21,9\%$). É de considerar as discontinuidades muito próximas (F_5), com 95 ocorrências ($\approx 11,8\%$), e, o grau menos catalogado, F_1 (descontinuidades muito afastadas), com 34 casos ($\approx 4,2\%$).

O grau de alteração mais comum é o W_2 (rocha ligeiramente alterada), com 471 registos ($\approx 58,5\%$), seguido do grau moderadamente alterado (W_3), com 213 ocorrências ($\approx 26,5\%$). O grau de alteração W_1 (rocha sã ou não alterada), embora menos expressiva, apresenta 94 ocorrências ($\approx 11,7\%$). Os

graus de alteração W_4 (rocha muito alterada) e W_5 (rocha completamente alterada), representam um número residual, com 25 ($\approx 3,1\%$) e 2 ($\approx 0,2\%$), respectivamente.

A nível de resistência à compressão uniaxial (UCS), manifesta-se um valor médio e mediano de aproximadamente 175 MPa e 153,5 MPa, respectivamente, com um desvio padrão de cerca de 81,4 MPa. Estes valores de resistência são fortemente influenciados pelos dados retirados na zona de exploração de rocha ornamental, representados pelas *scanlines* SC08, SC09 e SC10 (figura 51), onde os ensaios esclerométrico foram realizados na matriz rochosa invés da face de descontinuidade, consequência dos valores reduzidos de abertura. De um ponto de vista estatístico, e tendo em consideração que 10 estações geomecânicas não se enquadravam em nenhuma descontinuidade, de uma coleção de 180 registos, 122 (67,8%) evidenciam uma rocha com uma resistência à compressão uniaxial elevada (S_2), seguido de uma resistência muito elevada (S_1), com 54 ocorrências (30%). Foram registadas apenas 4 descontinuidades com uma resistência média (S_3), traduzindo-se em 2,2% dos casos.

O parâmetro da abertura pode ser dividido em nove subcategorias distintas, onde são destacadas as descontinuidades muito apertadas, com 383 ocorrências ($\approx 47,6\%$), descontinuidades abertas, com 220 casos ($\approx 27,3\%$) e descontinuidades razoavelmente largas, com 135 registos ($\approx 16,8\%$). Essas subcategorias podem ser acopladas em três grupos, descontinuidades fechadas (427 ocorrências, traduzidas a aproximadamente 53% dos casos), descontinuidades abertas (355 registos, refletindo 44,1% do conjunto) e descontinuidades muito abertas (23 ocorrências, ou aproximadamente 2,9% dos casos).

Os preenchimentos das descontinuidades são variados, em alguns casos registando uma combinação de dois materiais distintos. Destacam-se as descontinuidades sem qualquer preenchimento, com 317 registos ($\approx 39,4\%$), 210 descontinuidades preenchidas de rocha esmagada ($\approx 26,1\%$), e preenchimentos de argila dura e mole, com 162 ($\approx 20,1\%$) e 97 ($\approx 12,0\%$) ocorrências, respectivamente. Foi considerada a categoria “outro”, que engloba os enchimentos com um número residual de ocorrências (terra vegetal, quartzo e feldspato).

Relativamente à rugosidade das descontinuidades, o estudo estatístico foi realizado quanto ao seu grau. As descontinuidades algo rugosas (R_3) e as descontinuidades lisas (R_{1-2}) apresentam o maior número de ocorrências, com 374 ($\approx 46,5\%$) e 365 ($\approx 45,3\%$), respectivamente, enquanto as faces muito rugosas apresentam um número reduzido de casos, com 66 ($\approx 8,2\%$). Em relação ao plano de rugosidade, este pode ser dividido em três categorias: As faces denteadas, que relatam o maior número de ocorrências (544, ou aproximadamente 67,6%), seguidas das faces onduladas, com 167 casos ($\approx 20,7\%$), e as faces planas (94 registos, ou aproximadamente 11,7%).

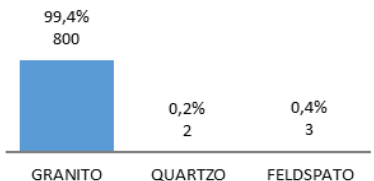
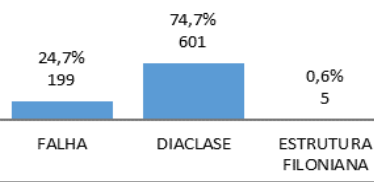
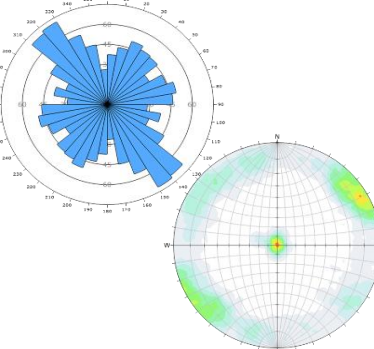
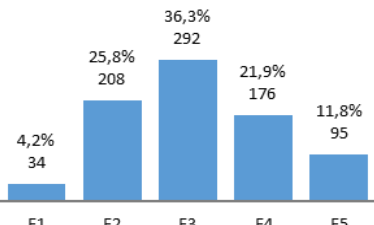
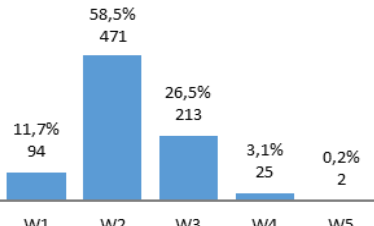
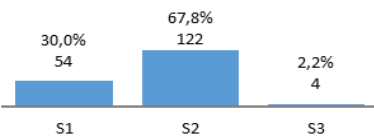
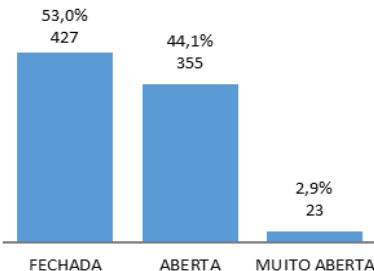
O parâmetro da continuidade está relacionado com a persistência, ou extensão, de uma descontinuidade. A maioria das descontinuidades são muito pouco contínuas, com 518 registros ($\approx 64,3\%$), seguidas das descontinuidades pouco contínuas e medianamente contínuas, com 164 ($\approx 20,4\%$) e 111 ($\approx 13,8\%$) ocorrências, respectivamente e as descontinuidades contínuas, apresentando o número menos expressivo de ocorrências com 12 ($\approx 1,5\%$).

A terminação das descontinuidades apresenta os casos mais uniformemente distribuídos pelas categorias, sendo a terminação em rocha a mais comum, com 334 ocorrências ($\approx 41,5\%$), descontinuidade com 308 casos ($\approx 38,3\%$) e finalmente obscura com 163 registros ($\approx 20,2\%$).

A curvatura de uma descontinuidade pode ser dividida em três classes, planas (C_{1-2}), representando 76,1% dos registros (613 descontinuidades planas), algo curvas (C_3), com 171 ocorrências ($\approx 21,2\%$) e descontinuidades muito curvas (C_{4-5}), com apenas 21 casos ($\approx 2,6\%$).

Finalmente, a presença de água é um fator crucial na aplicação de algumas classificações geomecânicas. A maior parte das descontinuidades, representando aproximadamente 88,8% das análises, apresentam-se secas (715 ocorrências), 80 descontinuidades encontravam-se húmidas ($\approx 9,9\%$) e somente 10 apresentavam uma percolação gotejante ($\approx 1,2\%$).

Quadro 32 - Quadro síntese de análise estatística dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos registados na generalidade das scanlines, segundo as propostas da ISRM (1978, 1981).

Parâmetro geológico-geotécnico		Qtd.	Perc.	Visualização gráfica	
N.º de Descontinuidades		805	100%	-	
Litologia	Granito	800	99,4%		
	Quartzo	2	0,2%		
	Feldspato	3	0,4%		
Descontinuidade	Falha	199	24,7%		
	Diaclase	601	74,7%		
	Estrutura Filoniana	5	0,6%		
Atitude Geológica (Principais famílias de descontinuidades)	1ª F	N 130 - 160° E; 79 - 89° SW	183	22,7%	
	2ª F	N 25 - 55° E; 76 - 86° SE	127	15,8%	
	3ª F	N 60 - 90° E; 76 - 86° SE	106	13,2%	
	4ª F	N 99 - 129° E; 78 - 88° NE	88	10,9%	
	SUBH 1ª F	N 4 - 89° E; 0 - 35° SE	54	6,7%	
	SUBH 2ª F	N 91 - 179° E; 0 - 35° SW	36	4,5%	
	Aleatórias		211	26,2%	
Grau de Fraturação	F ₁	Muito afastadas	34	4,2%	
	F ₂	Afastadas	208	25,8%	
	F ₃	Medianamente afastadas	292	36,3%	
	F ₄	Próximas	176	21,9%	
	F ₅	Muito próximas	95	11,8%	
Grau de Alteração	W ₁	Sã ou não alterada	94	11,7%	
	W ₂	Ligeiramente alterada	471	58,5%	
	W ₃	Moderadamente alterada	213	26,5%	
	W ₄	Muito alterada	25	3,1%	
	W ₅	Completamente alterada	2	0,2%	
Resistência à Compressão Uniaxial (UCS)	S ₁	Muito elevada	54	30,0%	
	S ₂	Elevada	122	67,8%	
	S ₃	Média	4	2,2%	
Abertura	Fechada	Muito apertada	383	47,6%	
		Apertada	25	3,1%	
		Parcialmente aberta	19	2,4%	
	Aberta	Aberta	220	27,3%	
		Razoavelmente larga	135	16,8%	
		Larga	0	0,0%	
	Muito aberta	Muito larga	23	2,9%	
		Extremamente larga	0	0,0%	
	Cavernosa	0	0,0%		

Quadro 32 – (continuação...)

Preenchimento	Argila dura		162	20,1%		
	Argila mole		97	12,0%		
	Rocha esmagada		210	26,1%		
	Nenhum		317	39,4%		
	Outro	Quartzo		7		0,9%
		Feldspato		3		0,4%
Terra vegetal		9	1,1%			
Rugosidade	Denteada		544	67,6%		
	Ondulada		167	20,7%		
	Plana		94	11,7%		
	R ₁₋₂	Lisa	365	45,3%		
	R ₃	Algo rugosa	374	46,5%		
	R ₄₋₅	Muito rugosa	66	8,2%		
Continuidade	Muito pouco contínua		518	64,3%		
	Pouco contínua		164	20,4%		
	Medianamente contínua		111	13,8%		
	Contínua		12	1,5%		
Terminação	Descontinuidade		308	38,3%		
	Obscura		163	20,2%		
	Rocha		334	41,5%		
Curvatura	C ₁₋₂	Plana	613	76,1%		
	C ₃	Algo curva	171	21,2%		
	C ₄₋₅	Muito curva	21	2,6%		
Presença de Água	Seco		715	88,8%		
	Húmido		80	9,9%		
	Gotejante		10	1,2%		

4.4.2. Caracterização das principais famílias de descontinuidades

Com mencionado no quadro 32, foram admitidas quatro famílias de descontinuidades sub-verticais e duas famílias de descontinuidades sub-horizontais. A figura 53 representa o diagrama de rosetas

e o estereograma representativas de todas as descontinuidades. O quadro 33 apresenta os mesmos diagramas distinguidos para as diferentes famílias de descontinuidades.

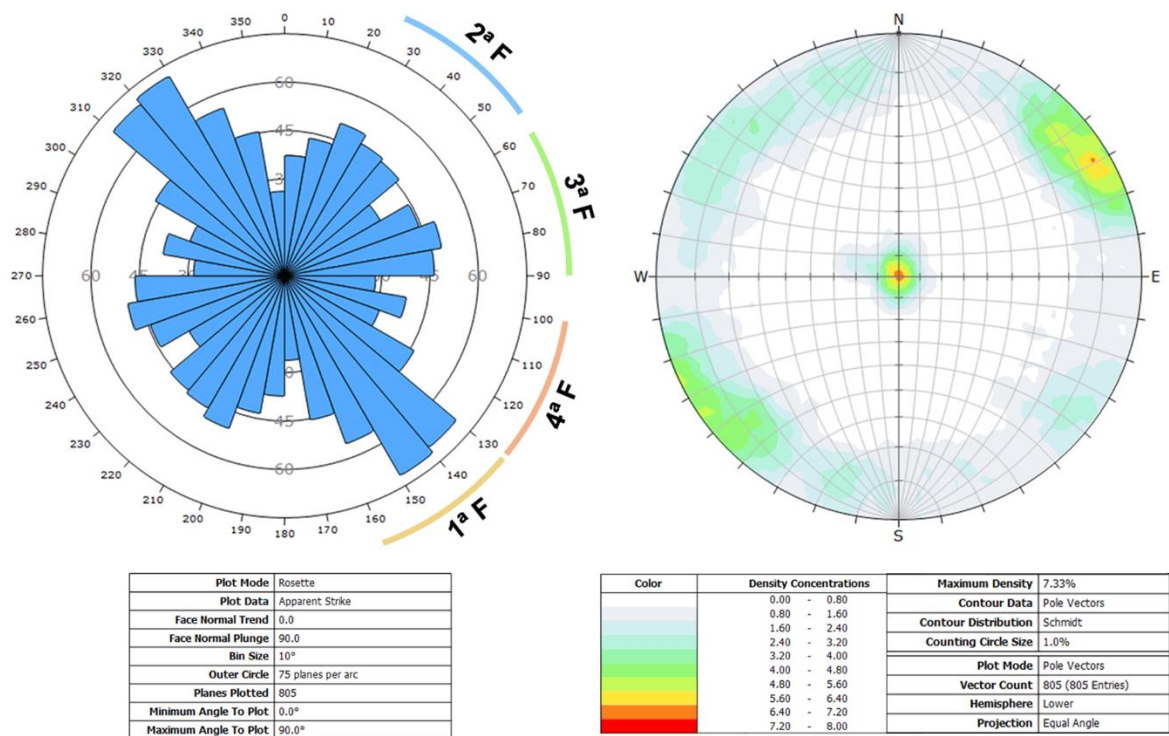
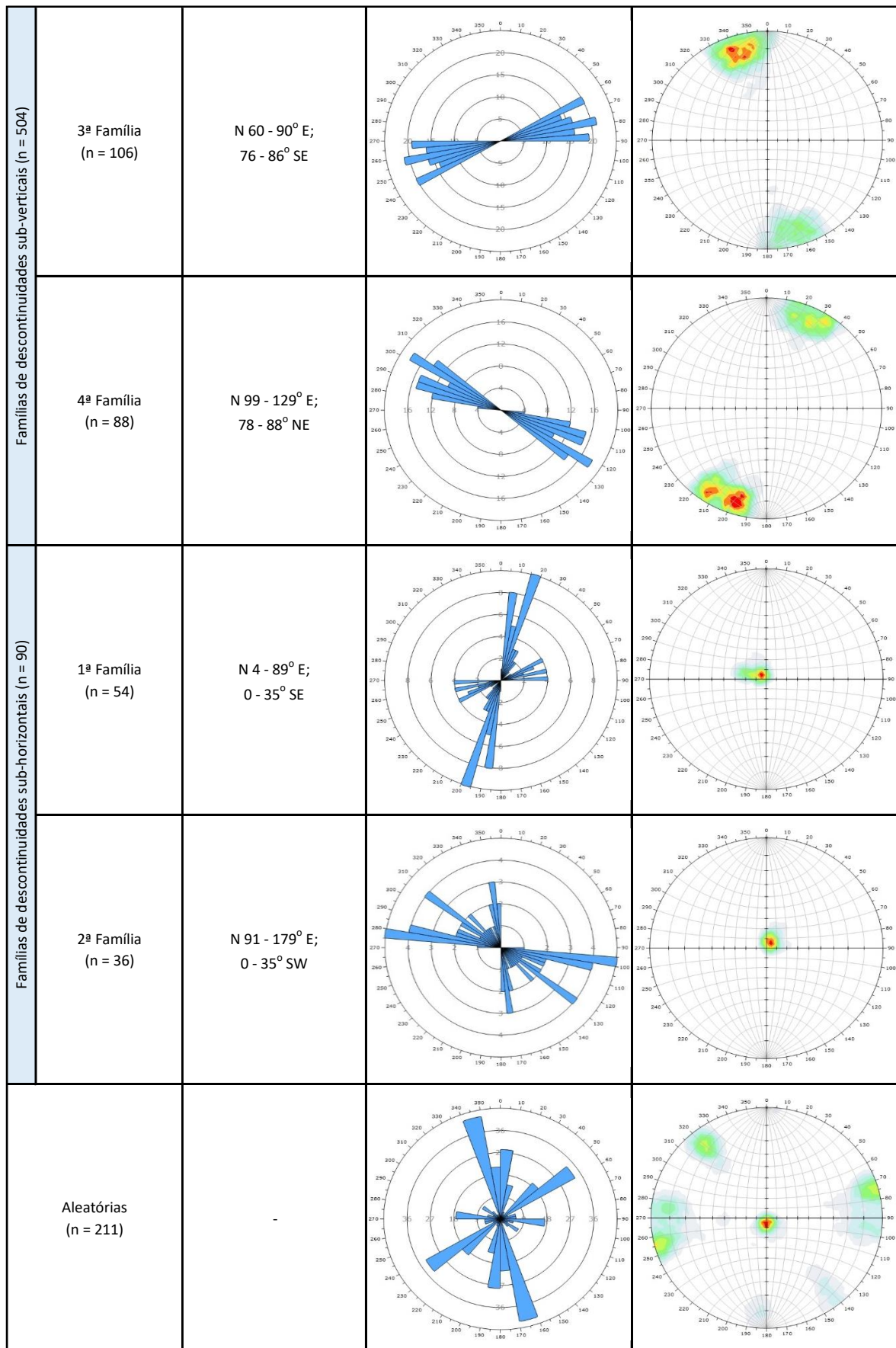


Figura 53 - Diagramas geológico-estruturais: diagrama de rosetas e estereograma representativos da globalidade das descontinuidades, recorrido ao software geo-informático *Rocscience Dips* (v.6.008).

Quadro 33 - Intervalo predominantes de direção e inclinação, diagrama de rosetas e estereograma representativo das diferentes famílias de descontinuidades.

	Família de descontinuidades	Intervalo de direção e inclinação predominante	Diagrama de rosetas	Estereograma
Famílias de descontinuidades sub-verticais (n = 504)	1ª Família (n = 183)	N 130 - 160° E; 79 - 89° SW		
	2ª Família (n = 127)	N 25 - 55° E; 76 - 86° SE		

Quadro 33 – (continuação...)



A figura 54 apresenta uma síntese do número de descontinuidades cartografadas em termos da sua direção, em amplitudes de 30°, a sua inclinação e seu quadrante.

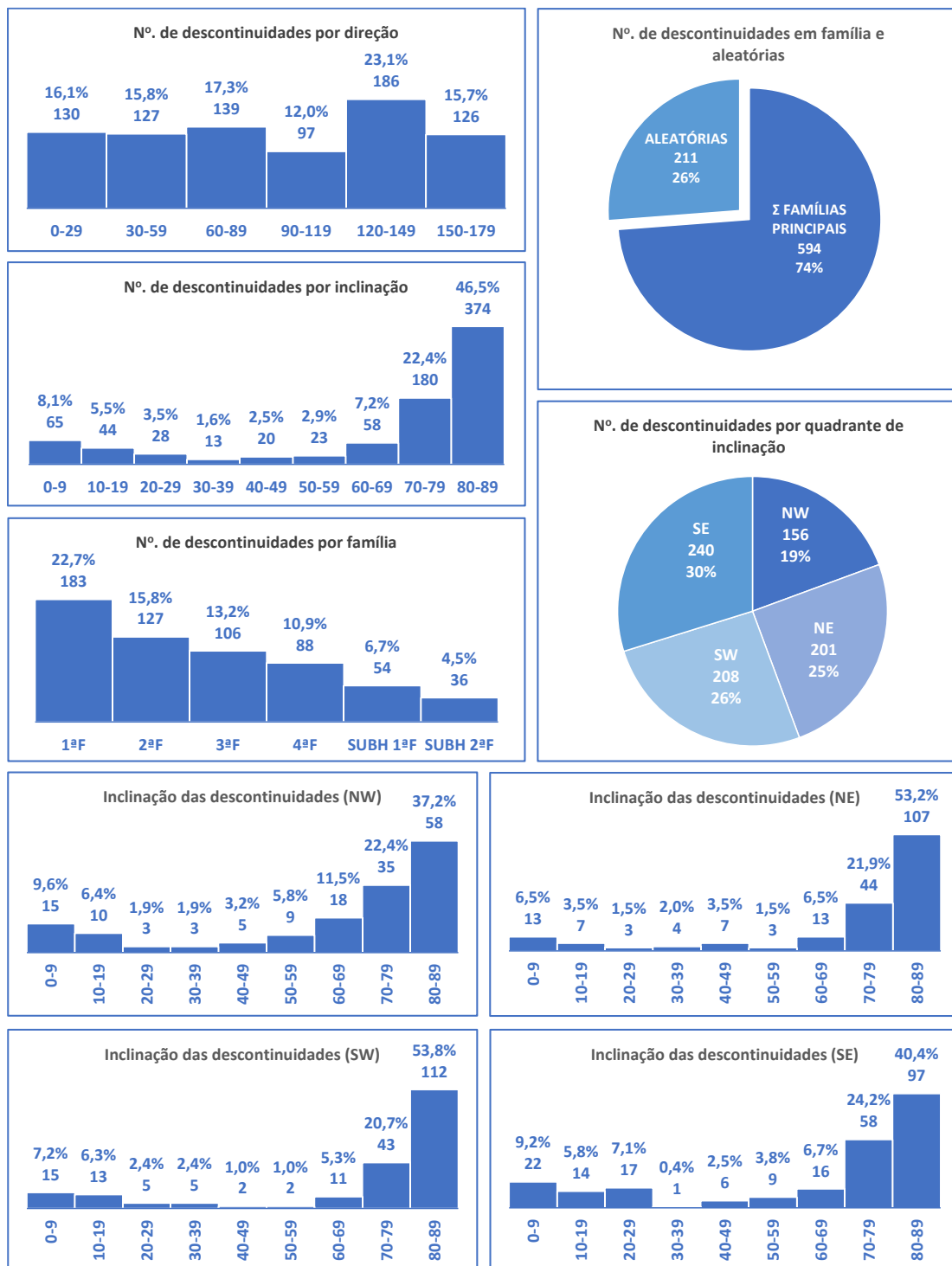


Figura 54 - Gráficos resumo da contagem geral de descontinuidades distribuídas por intervalos de direção, inclinação e quadrante, número de descontinuidades por família, geral e aleatórias e principais amplitudes de inclinação de acordo com o seu quadrante.

Na mesma figura está também representado graficamente o número de descontinuidades pertencentes às principais famílias definidas, e a contagem das remanescentes, denominadas de descontinuidades aleatórias e o intervalo de inclinação predominante de acordo com o quadrante.

4.4.3. Definição das zonas geotécnicas

A síntese e revisão dos parâmetros geológico-geotécnicos organizados por patamares, ou pisos, permitiu desenvolver uma proposta de cartografia de zonamento geotécnico do maciço rochoso explorado na Pedreira do Poço Negro. O ponto de partida para o exercício foi organizar a informação relativa à heterogeneidade litológica, grau de alteração, espaçamento e resistência mecânica à compressão (ISRM, 1978, 1981), gerando gráficos relativos ao parâmetro geotécnico e dispostos por pisos (Anexo I). Desta forma, foi possível esboçar o zonamento geotécnico, com o respetivo número de descontinuidades pertencentes a cada zona (quadro 34).

Quadro 34 - Denominação e descrição das zonas geotécnicas definidas com a respetiva contagem de descontinuidades incluídas em cada uma.

Zona geotécnica	Descrição	Exploração	N.º de desc.
ZG0	Zona geotécnica inapta para exploração, consistindo essencialmente por terra vegetal, rocha granítica muito alterada a decomposta (W_{4-5}) e de resistência muito baixa (S_{4-5}).	-	0
ZG1.A	Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W_2 a W_3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a próximas, com média no intervalo 10 a 60 cm (F_3 a F_4), com mediana de 30 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 120 a 190 MPa (S_2), com mediana de 154 MPa (S_2).	Agregados	441
ZG1.B	Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W_2); ii) espaçamento das descontinuidades próximas a medianamente afastadas, com média no intervalo 20 a 80 cm (F_3 a F_2), com mediana de 40 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 100 a 150 MPa (S_2), com mediana de 121 MPa (S_2).		261
ZG2.A	Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W_2); ii) espaçamento das descontinuidades muito a medianamente afastadas, com média no intervalo 30 a 195 cm (F_3 a F_2), com mediana de 80 cm (F_2); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valores superiores a 250 MPa (S_1).	Ornamental	53
ZG2.B	Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W_2 a W_3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a afastadas, com média no intervalo 20 a 100 cm (F_3 a F_2), com mediana de 39 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valor da mediana superior a 210 MPa (S_1).		50

Zona Geotécnica	N.º de Descontinuidades	Porcentagem
ZG1.A	441	54,8%
ZG1.B	261	32,4%
ZG2.A	53	6,6%
ZG2.B	50	6,2%

Conclui-se que foram definidas três zonas geotécnicas maiores, sendo que a ZG1 e a ZG2 estão divididas cada uma em duas subzonas. A ZG0 trata-se de uma zona geotécnica com propriedades

geológico-geotécnicas e geomecânicas desadequadas para a sua exploração, consistindo essencialmente por terra vegetal, rocha granítica muito alterada e decomposta (W_{4-5}) e de resistência muito baixa (S_{4-5}).

A subzona geotécnica ZG1.A é a que apresenta um maior número de descontinuidades estudadas, e esta apresenta-se, de um modo geral, mais resistente que a subzona ZG1.B, com uma mediana de 154 MPa. Por outro lado, as descontinuidades encontram-se, de um modo geral, mais afastadas entre si na subzona ZG1.B, com um valor de mediana de 40 cm (F_3), e ligeiramente alteradas (W_2), em comparação com a subzona ZG1.A, que apresenta um valor de espaçamento mediano de 30 cm (F_3) e o grau de alteração mais predominantes é o W_2 e W_3 .

A ZG2 apresenta atributos geológico-geotécnicos e geomecânicos eminentes em comparação com a ZG1. Esta zona geotécnica é atualmente explorada com fins ornamentais, embora o *Fracture Intercept, F* (ISRM, 1978, 1981), aponte que a rocha está bastante fraturada.

A subzona ZG2.A é a mais favorável em termos de espaçamento, grau de alteração e resistência da área estudada da pedreira. O maciço encontra-se, de um modo geral, ligeiramente alterado (W_2), descontinuidades muito a medianamente afastadas, com um valor de espaçamento mediano de 80 cm (F_2), ultrapassando, em algumas instâncias, 250 cm (F_1), e uma resistência à compressão uniaxial elevada, excedendo 250 MPa (S_1).

Por outro lado, a subzona ZG2.B encontram-se ligeiramente a moderadamente alterada (W_2 a W_3), as descontinuidades encontram-se medianamente afastadas a afastadas, com espaçamentos enquadrados num intervalo de 20 a 100 cm (F_3 a F_2) e resistência à compressão uniaxial muito elevada, rondando 210 MPa (S_1).

Embora o quadro 34 apresente um número reduzido de descontinuidades registadas nas subzonas ZG2.A e ZG2.B, a distribuição de metros lineares analisados em cada subzona geotécnica e método de exploração é equilibrado.

O quadro 35 apresenta um estudo estatístico, a nível de médias, medianas e desvios-padrão referentes às diferentes zonas geotécnicas, que comprovam, numericamente e graficamente, os intervalos de espaçamento (F) e resistência à compressão uniaxial (S) referidos no quadro 34. Em adição, e antecipando a aplicação das diferentes classificações e índices geomecânicos, o mesmo estudo foi realizado a nível de abertura (A) e persistência (L) das descontinuidades (ISRM, 1978, 1981).

Quadro 35 - Estudo estatístico a nível dos parâmetros geológico-geotécnicos de espaçamento, resistência, abertura e continuidade para cada zona geotécnica (ISRM, 1978, 1981).

Zona Geotécnica		ZG0	ZG1.A	ZG1.B	ZG2.A	ZG2.B	Geral	Representação gráfica
Nº. Desc.		0	441	261	53	50	805	-
Espaçamento, F	Média	-	47,59 cm	54,67 cm	173,08 cm	78,90 cm	58,07 cm	
	Mediana	-	30,00 cm	40,00 cm	80,00 cm	39,00 cm	35,00 cm	
	Desvio padrão	-	56,94 cm	47,67 cm	196,14 cm	83,30 cm	79,53 cm	
Resistência, S	Média	-	148,60 MPa	125,72 MPa	322,96 MPa	231,20 MPa	175,02 MPa	
	Mediana	-	153,80 MPa	120,55 MPa	320,30 MPa	209,50 MPa	153,50 MPa	
	Desvio padrão	-	45,63 MPa	36,54 MPa	43,02 MPa	90,66 MPa	81,40 MPa	
Abertura, A	Média	-	2,52 mm	1,95 mm	1,04 mm	0,26 mm	2,10 mm	
	Mediana	-	1,00 mm	0,00 mm	0,10 mm	0,20 mm	0,20 mm	
	Desvio padrão	-	5,09 mm	8,19 mm	3,01 mm	0,31 mm	6,08 mm	
Continuidade, L	Média	-	3,26 m	2,90 m	4,13 m	3,41 m	3,21 m	
	Mediana	-	2,05 m	1,90 m	2,20 m	2,25 m	2,00 m	
	Desvio padrão	-	3,37 m	3,92 m	6,11 m	4,86 m	3,90 m	

(página propositadamente em branco)

De modo a prever o índice dimensional, ou a dimensão média do bloco, foi calculado o espaçamento médio, em metros, de cada família de descontinuidades na área geral de exploração, e por zona geotécnica (quadro 36).

Quadro 36 - Estimativa do espaçamento médio para cada família de descontinuidades.

Zona Geotécnica	Espaçamento médio					
	1ª Família	2ª Família	3ª Família	4ª Família	1ª Família SUBH	2ª Família SUBH
Geral	0,62 m	0,68 m	0,55 m	0,58 m	0,59 m	0,58 m
Agregados						
ZG1.A	0,45 m	0,59 m	0,56 m	0,41 m	0,56 m	0,43 m
ZG1.B	0,64 m	0,60 m	0,56 m	0,79 m	0,33 m	0,32 m
Ornamental						
ZG2.A	1,40 m	2,41 m	0,94 m	-	1,00 m	-
ZG2.B	0,76 m	0,76 m	0,46 m	-	0,96 m	-

Desta forma, apresentam-se nos seguintes subtópicos, uma descrição e análise estatística mais pormenorizada para cada zona e subzona geotécnica.

4.4.3.1. ZG1.A

Na ZG1.A foram analisadas 441 descontinuidades proveniente das *scanlines* SC1, SC2.A, SC2.B, SC3.A e SC3.B. A litologia predominante é o granito biotítico de grão médio a fino, com 440 ocorrências. Diáclases são o tipo de estrutura geológica mais comum ($\approx 75,3\%$), havendo uma presença considerável de falhas ($\approx 24,5\%$).

Dentro desta subzona geotécnica, foram definidas quatro famílias de descontinuidades, e duas famílias de descontinuidades sub-horizontais, das quais a que tem maior predominância é a 1ª família ($\approx 28,1\%$), cujo intervalo de direção é de N 140 a 170° E. Cerca de 22,4% das descontinuidades estudadas são consideradas aleatórias.

Como referenciado no quadro 36, o valor de mediana do espaçamento é de 30 cm, com média no intervalo de 10 a 60 cm, destacando assim os graus de fraturação F_3 ($\approx 35,8\%$) e F_4 ($\approx 23,4\%$).

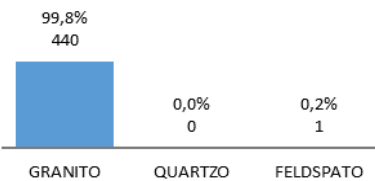
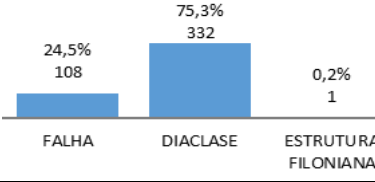
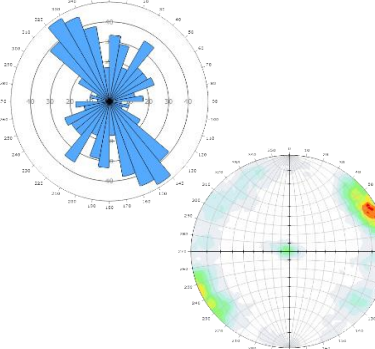
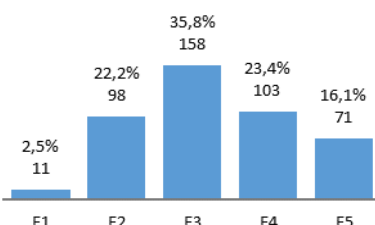
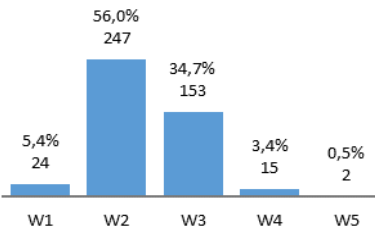
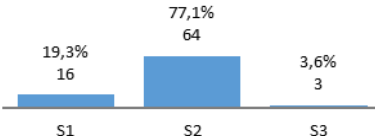
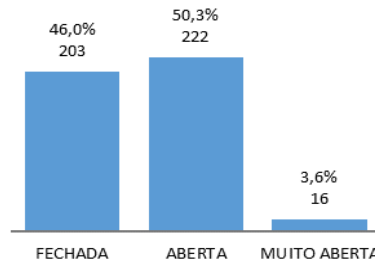
A nível de grau de alteração, aproximadamente 56% das descontinuidades encontravam-se ligeiramente alteradas, e cerca de 34,7% apresentavam-se moderadamente alteradas. A resistência à compressão uniaxial média encontra-se entre 120 e 190 MPa, transcrevendo para uma resistência elevada (S_2).

O grau de abertura fechada e aberta encontram-se bastante próximas ($\approx 46\%$ e $\approx 50,3\%$, respetivamente), das quais $\approx 35,8\%$ não tinham qualquer preenchimento, e $\approx 27,9\%$ possuíam rocha esmagada. As descontinuidades apresentavam, de um modo geral, uma face denteada ($\approx 65,5\%$) algo rugosa ($\approx 47,6\%$) ou lisa ($\approx 46,5\%$).

As descontinuidades são, de um modo geral, muito pouco contínuas ($\approx 62,8\%$), terminando maioritariamente noutra descontinuidade ($\approx 44,4\%$) ou em rocha ($\approx 36,7\%$), com um grau de curvatura C_{1-2} , ou planas ($\approx 76\%$). Finalmente, a percolação da água é praticamente inexistente nesta zona geotécnica, com cerca de $88,2\%$ das descontinuidades completamente secas.

O quadro 37 apresenta uma tabela resumo dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos propostos pela ISRM (1978, 1981), referentes à ZG1.A.

Quadro 37 - Quadro síntese da análise estatística dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos registrados na ZG1.A, segundo as propostas da ISRM (1978, 1981).

Parâmetro geológico-geotécnico		Qtd.	Perc.	Visualização gráfica	
Nº. de Descontinuidades		441	100%	-	
Litologia	Granito	440	99,8%		
	Quartzo	0	0,0%		
	Feldspato	1	0,2%		
Descontinuidade	Falha	108	24,5%		
	Diaclase	332	75,3%		
	Estrutura Filoniana	1	0,2%		
Atitude Geológica (Principais famílias de descontinuidades)	1ª F	N 140 - 170° E; 79 - 89° SW	124	28,1%	
	2ª F	N 27 - 57° E; 76 - 86° NW	75	17,0%	
	3ª F	N 110 - 140° E; 76 - 86° SW	54	12,2%	
	4ª F	N 60 - 90° E; 79 - 89° SE	43	9,8%	
	SUBH 1ª F	N 4 - 89° E; 0 - 35° SE	32	7,3%	
	SUBH 2ª F	N 96 - 179° E; 0 - 35° SW	14	3,2%	
	Aleatórias		99	22,4%	
Grau de Fraturação	F ₁	Muito afastadas	11	2,5%	
	F ₂	Afastadas	98	22,2%	
	F ₃	Medianamente afastadas	158	35,8%	
	F ₄	Próximas	103	23,4%	
	F ₅	Muito próximas	71	16,1%	
Grau de Alteração	W ₁	Sã ou não alterada	24	5,4%	
	W ₂	Ligeiramente alterada	247	56,0%	
	W ₃	Moderadamente alterada	153	34,7%	
	W ₄	Muito alterada	15	3,4%	
	W ₅	Completamente alterada	2	0,5%	
Resistência à Compressão Uniaxial (UCS)	S ₁	Muito elevada	16	19,3%	
	S ₂	Elevada	64	77,1%	
	S ₃	Média	3	3,6%	
Abertura	Fechada	Muito apertada	191	43,3%	
		Apertada	5	1,1%	
		Parcialmente aberta	7	1,6%	
	Aberta	Aberta	116	26,3%	
		Razoavelmente larga	106	24,0%	
		Larga	0	0,0%	
	Muito aberta	Muito larga	16	3,6%	
		Extremamente larga	0	0,0%	
	Cavernosa	0	0,0%		

Quadro 37 – (continuação...)

Preenchimento	Argila dura		83	18,8%	
	Argila mole		64	14,5%	
	Rocha esmagada		123	27,9%	
	Nenhum		158	35,8%	
	Outro		13	2,9%	
Rugosidade	Denteada		289	65,5%	
	Ondulada		122	27,7%	
	Plana		30	6,8%	
	R ₁₋₂	Lisa	205	46,5%	
	R ₃	Algo rugosa	210	47,6%	
	R ₄₋₅	Muito rugosa	26	5,9%	
Continuidade	Muito pouco contínua		277	62,8%	
	Pouco contínua		83	18,8%	
	Medianamente contínua		71	16,1%	
	Contínua		10	2,3%	
Terminação	Descontinuidade		196	44,4%	
	Obscura		83	18,8%	
	Rocha		162	36,7%	
Curvatura	C ₁₋₂	Plana	335	76,0%	
	C ₃	Algo curva	91	20,6%	
	C ₄₋₅	Muito curva	15	3,4%	
Presença de Água	Seco		389	88,2%	
	Húmido		48	10,9%	
	Gotejante		4	0,9%	

4.4.3.2. ZG1.B

A ZG1.B é composta pelas *scanlines* SC4, SC5, SC6 e SC7, e foram estudadas um total de 261 descontinuidades através da técnica da amostragem linear.

Em semelhança à ZG1.A, a ZG1.B é composta essencialmente por granito biotítico, de grão médio a fino ($\approx 98,5\%$), por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O tipo de descontinuidades mais comum é novamente a diáclase, com 187 ocorrências ($\approx 71,6\%$), cujo grau de alteração predominantes é o W_2 , com ligeira alteração ($\approx 60,5\%$).

Foram definidas quatro famílias de descontinuidades, e duas famílias de descontinuidades sub-horizontais. A família mais presente é a 1ª F, alcançando 57 descontinuidades, cujo intervalo de direção é de N 106 – 136° E.

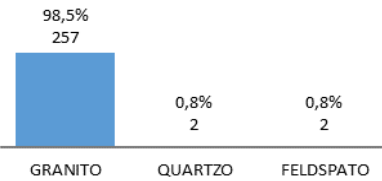
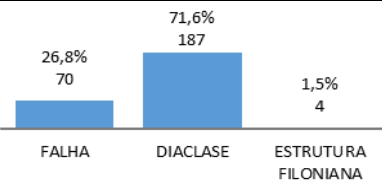
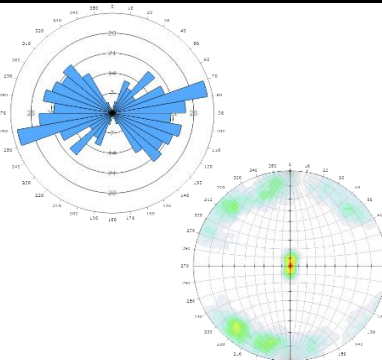
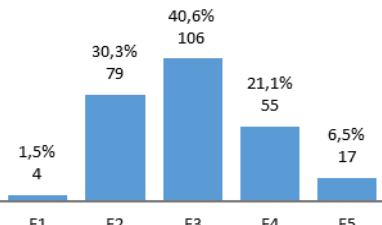
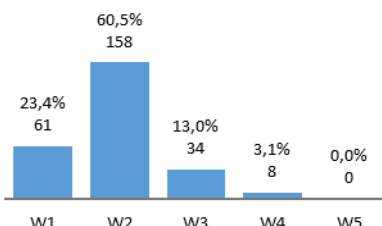
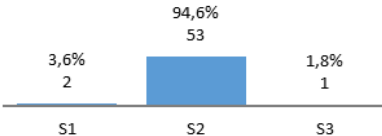
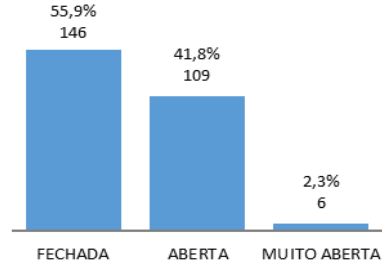
O valor mediano do espaçamento é de 40 cm (quadro 34), destacando os graus de fraturação F_3 ($\approx 40,6\%$) e F_2 ($\approx 30,3\%$). O valor da mediana da resistência à compressão uniaxial é de 121 MPa, onde cerca de 94,6% das ocorrências enquadra-se num grau de resistência elevado (S_2).

As descontinuidades encontram-se maioritariamente fechadas ($\approx 55,9\%$), onde cerca de 42,5% não apresentam qualquer preenchimento. A face das descontinuidades é geralmente denteada ($\approx 67,4\%$) e lisa ($\approx 47,1\%$).

Estas estruturas geológicas são frequentemente muito pouco contínuas ($\approx 67,8\%$), terminando habitualmente na rocha ($\approx 40,6\%$). As descontinuidades permanecem planas ($\approx 80,1\%$) na sua continuidade, onde, na sua globalidade, se encontram secas ($\approx 89,3\%$).

O quadro 38 representa o resumo dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos referentes à subzona geotécnica ZG1.B, propostos pela ISRM (1978, 1981).

Quadro 38 - Quadro síntese de análise estatística dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos registados na ZG1.B, segundo as propostas da ISRM (1978, 1981).

Parâmetro geológico-geotécnico		Qtd.	Perc.	Visualização gráfica	
Nº. de Descontinuidades		261	100%	-	
Litologia	Granito	257	98,5%		
	Quartzo	2	0,8%		
	Feldspato	2	0,8%		
Descontinuidade	Falha	70	26,8%		
	Diaclase	187	71,6%		
	Estrutura Filoniana	4	1,5%		
Atitude Geológica (Principais famílias de descontinuidades)	1ª F	N 106 - 136° E; 78 - 88° NE	57	21,8%	
	2ª F	N 60 - 90° E; 72 - 82° SE	55	21,1%	
	3ª F	N 26 - 56° E; 76 - 86° SE	36	13,8%	
	4ª F	N 136 - 166° E; 79 - 89° SW	23	8,8%	
	SUBH 1ª F	N 91 - 149° E; 0 - 35° SW	17	6,5%	
	SUBH 2ª F	N 24 - 89° E; 0 - 35° NW	17	6,5%	
	Aleatórias		56	21,5%	
Grau de Fraturação	F ₁	Muito afastadas	4	1,5%	
	F ₂	Afastadas	79	30,3%	
	F ₃	Medianamente afastadas	106	40,6%	
	F ₄	Próximas	55	21,1%	
	F ₅	Muito próximas	17	6,5%	
Grau de Alteração	W ₁	Sã ou não alterada	61	23,4%	
	W ₂	Ligeiramente alterada	158	60,5%	
	W ₃	Moderadamente alterada	34	13,0%	
	W ₄	Muito alterada	8	3,1%	
	W ₅	Completamente alterada	0	0,0%	
Resistência à Compressão Uniaxial (UCS)	S ₁	Muito elevada	2	3,6%	
	S ₂	Elevada	53	94,6%	
	S ₃	Média	1	1,8%	
Abertura	Fechada	Muito apertada	140	53,6%	
		Apertada	5	1,9%	
		Parcialmente aberta	1	0,4%	
	Aberta	Aberta	82	31,4%	
		Razoavelmente larga	27	10,3%	
		Larga	0	0,0%	
	Muito aberta	Muito larga	6	2,3%	
		Extremamente larga	0	0,0%	
	Cavernosa	0	0,0%		

Quadro 38 – (continuação...)

Preenchimento	Argila dura		66	25,3%	
	Argila mole		15	5,7%	
	Rocha esmagada		64	24,5%	
	Nenhum		111	42,5%	
	Outro		5	1,9%	
Rugosidade	Denteada		176	67,4%	
	Ondulada		34	13,0%	
	Plana		51	19,5%	
	R ₁₋₂	Lisa	123	47,1%	
	R ₃	Algo rugosa	109	41,8%	
	R ₄₋₅	Muito rugosa	29	11,1%	
Continuidade	Muito pouco contínua		177	67,8%	
	Pouco contínua		51	19,5%	
	Medianamente contínua		33	12,6%	
	Contínua		0	0,0%	
Terminação	Descontinuidade		89	34,1%	
	Obscura		66	25,3%	
	Rocha		106	40,6%	
Curvatura	C ₁₋₂	Plana	209	80,1%	
	C ₃	Algo curva	51	19,5%	
	C ₄₋₅	Muito curva	1	0,4%	
Presença de Água	Seco		233	89,3%	
	Húmido		22	8,4%	
	Gotejante		6	2,3%	

4.4.3.3. ZG2.A

A ZG2.A e a ZG2.B são zonas onde atualmente se dá a exploração de rocha ornamental. A subzona ZG2.A, que apresenta os melhores atributos geológico-geotécnicos e geomecânicos de toda a pedreira, inclui as *scanlines* SC8 e SC9, das quais foram estudadas 53 descontinuidades, cuja litologia é unicamente granito.

Das descontinuidades consideradas, cerca de 11,3% são falhas e 88,7% são diáclases, espaçadas medianamente 80cm entre si (F_2). Foram definidas três famílias de descontinuidades e uma família de descontinuidades sub-horizontal, cuja família mais predominante aborda todas as descontinuidades no intervalo de direções N 1 a 31° E ($\approx 41,5\%$).

O grau de alteração predominante nesta subzona geotécnica é o W_2 , ou ligeiramente alterada ($\approx 88,7\%$). Tratando-se da subzona com mais competências a nível geomecânico, com uma resistência à compressão uniaxial média superior a 250 MPa, o grau de resistência atribuído é de S_1 , ou resistência muito elevada (100%).

A maior parte das descontinuidades encontram-se fechadas ($\approx 64,2\%$), as quais têm uma grande influência na ausência de preenchimento ($\approx 64,2\%$). O plano de rugosidade predominante é denteado ($\approx 75,5\%$), liso ($\approx 56,65$).

As descontinuidades são geralmente muito pouco contínuas ($\approx 69,8\%$), terminando, na maioria dos casos, na rocha ($\approx 64,2\%$), apresentando uma curvatura de classe C_{1-2} ($\approx 83\%$), ou seja, descontinuidades planas. Estas encontram-se, em aproximadamente 81,1% dos registos, secas.

O quadro 39 apresenta o estudo estatístico dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos propostos pela ISRM (1978, 1981), referente à subzona geotécnica ZG2.A.

Quadro 39 - Quadro síntese de análise estatística dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos registados na ZG2.A, segundo as propostas da ISRM (1978, 1981).

Parâmetro geológico-geotécnico		Qtd.	Perc.	Visualização gráfica	
N.º de Descontinuidades		53	100%	-	
Litologia	Granito	53	100%		
	Quartzo	0	0,0%		
	Feldspato	0	0,0%		
Descontinuidade	Falha	6	11,3%		
	Diaclase	47	88,7%		
	Estrutura Filoniana	0	0,0%		
Atitude Geológica (Principais famílias de descontinuidades)	1ª F	N 1 - 31º E; 76 - 86º SE	22	41,5%	
	2ª F	N 150 - 180º E; 79 - 89º NE	7	13,2%	
	3ª F	N 42 - 72º E; 79 - 89º NW	5	9,4%	
	SUBH 1ª F	N 8 - 26º E; 0 - 35º SE	8	15,1%	
	Aleatórias		11	20,8%	
Grau de Fraturação	F ₁	Muito afastadas	15	28,3%	
	F ₂	Afastadas	14	26,4%	
	F ₃	Medianamente afastadas	10	18,9%	
	F ₄	Próximas	9	17,0%	
	F ₅	Muito próximas	5	9,4%	
Grau de Alteração	W ₁	Sã ou não alterada	0	0,0%	
	W ₂	Ligeiramente alterada	47	88,7%	
	W ₃	Moderadamente alterada	5	9,4%	
	W ₄	Muito alterada	1	1,9%	
	W ₅	Completamente alterada	0	0,0%	
Resistência à Compressão Uniaxial (UCS)	S ₁	Muito elevada	27	100%	
	S ₂	Elevada	0	0,0%	
	S ₃	Média	0	0,0%	
Abertura	Fechada	Muito apertada	31	58,5%	
		Apertada	2	3,8%	
		Parcialmente aberta	1	1,9%	
	Aberta	Aberta	16	30,2%	
		Razoavelmente larga	2	3,8%	
		Larga	0	0,0%	
	Muito aberta	Muito larga	1	1,9%	
		Extremamente larga	0	0,0%	
	Cavernosa	0	0,0%		

Quadro 39 – (continuação...)

Preenchimento	Argila dura		5	9,4%	
	Argila mole		11	20,8%	
	Rocha esmagada		3	5,7%	
	Nenhum		34	64,2%	
	Outro		0	0,0%	
Rugosidade	Denteada		40	75,5%	
	Ondulada		0	0,0%	
	Plana		13	24,5%	
	R ₁₋₂	Lisa	30	56,6%	
	R ₃	Algo rugosa	23	43,4%	
	R ₄₋₅	Muito rugosa	0	0,0%	
Continuidade	Muito pouco contínua		37	69,8%	
	Pouco contínua		13	24,5%	
	Medianamente contínua		1	1,9%	
	Contínua		2	3,8%	
Terminação	Descontinuidade		13	24,5%	
	Obscura		6	11,3%	
	Rocha		34	64,2%	
Curvatura	C ₁₋₂	Plana	44	83,0%	
	C ₃	Algo curva	9	17,0%	
	C ₄₋₅	Muito curva	0	0,0%	
Presença de Água	Seco		43	81,1%	
	Húmido		10	18,9%	
	Gotejante		0	0,0%	

4.4.3.4. ZG2.B

A subzona geotécnica ZG2.B é constituída unicamente pela *scanline* SC10, onde foram contabilizadas apenas 50 descontinuidades. Das 50 descontinuidades, todas elas apresentavam litologia granítica (100%), cujos graus de alteração predominantes são W_3 ($\approx 42\%$), moderadamente alterado, e W_2 ($\approx 38\%$), ligeiramente alterado.

70% das descontinuidades estudadas foram consideradas diáclases, e foram encaradas três famílias de descontinuidades e uma família de descontinuidades sub-horizontais. A família predominante é a primeira, com 16 ocorrências, ou 32%, com um intervalo de direções de N 120 a 150° E.

O valor mediano do espaçamento na ZG2.B é de 39 cm, com média no intervalo 20 a 100 cm (F_3 a F_2), tratando-se de descontinuidades medianamente afastadas a afastadas. A resistência à compressão uniaxial média insere-se na classe S_1 (rocha com resistência muito elevada), cujo valor da mediana é de 210 MPa.

Aproximadamente 88% das descontinuidades encontram-se fechadas, contudo, o preenchimento mais registrado é de rocha esmagada ($\approx 40\%$). O plano de rugosidade mais comum é, novamente, denteado (≈ 78) e algo rugoso ($\approx 64\%$).

As descontinuidades são maioritariamente muito pouco contínuas ($\approx 54\%$), terminando cerca de 64% delas na rocha. Quanto à curvatura, 50% são planas, e 100% encontram-se completamente secas.

O quadro 40 demonstra a estatística dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos, de acordo com as recomendações da ISRM (1978, 1981), referente à subzona geotécnica ZG2.B.

Quadro 40 - Quadro síntese de análise estatística dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos registados na ZG2.B, segundo as propostas da ISRM (1978, 1981).

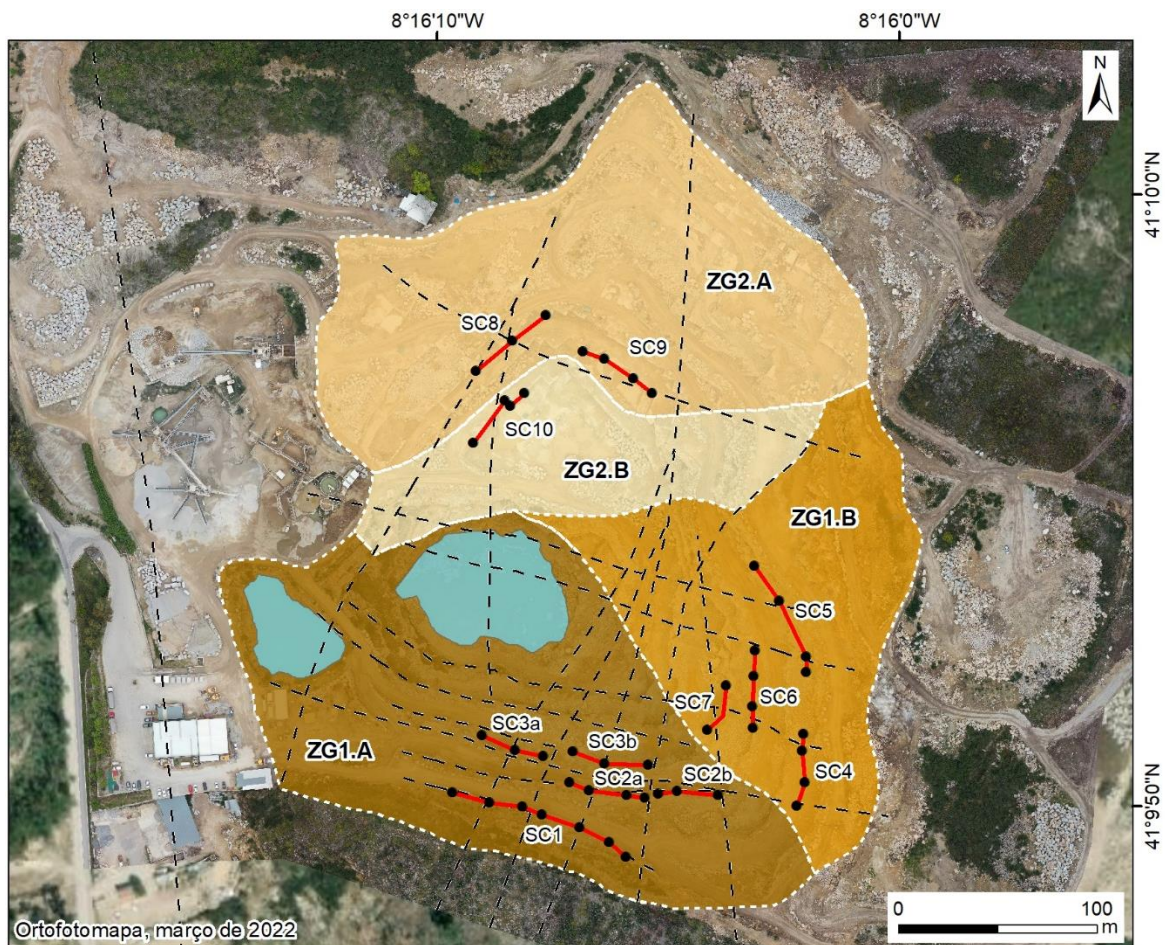
Parâmetro geológico-geotécnico			Qtd.	Perc.	Visualização gráfica
Nº. de Descontinuidades			50	100%	-
Litologia	Granito		50	100%	
	Quartzo		0	0,0%	
	Feldspato		0	0,0%	
Descontinuidade	Falha		15	30,0%	
	Diaclase		35	70,0%	
	Estrutura Filoniana		0	0,0%	
Atitude Geológica (Principais famílias de descontinuidades)	1ª F	N 120 - 150° E; 78 - 88° SW	16	32,0%	
	2ª F	N 150 - 180° E; 73 - 83° NE	11	22,0%	
	3ª F	N 84 - 114° E; 76 - 86° SW	7	14,0%	
	SUBH 1ª F	N 123 - 162° E; 0 - 35° SW	4	8,0%	
	Aleatórias		12	24,0%	
Grau de Fraturação	F ₁	Muito afastadas	4	8,0%	
	F ₂	Afastadas	17	34,0%	
	F ₃	Medianamente afastadas	18	36,0%	
	F ₄	Próximas	9	18,0%	
	F ₅	Muito próximas	2	4,0%	
Grau de Alteração	W ₁	Sã ou não alterada	9	18,0%	
	W ₂	Ligeiramente alterada	19	38,0%	
	W ₃	Moderadamente alterada	21	42,0%	
	W ₄	Muito alterada	1	2,0%	
	W ₅	Completamente alterada	0	0,0%	
Resistência à Compressão Uniaxial (UCS)	S ₁	Muito elevada	9	64,3%	
	S ₂	Elevada	5	35,7%	
	S ₃	Média	0	0,0%	
Abertura	Fechada	Muito apertada	21	42,0%	
		Apertada	13	26,0%	
		Parcialmente aberta	10	20,0%	
	Aberta	Aberta	6	12,0%	
		Razoavelmente larga	0	0,0%	
		Larga	0	0,0%	
	Muito aberta	Muito larga	0	0,0%	
		Extremamente larga	0	0,0%	
	Cavernosa	0	0,0%		

Quadro 40 – (continuação...)

Preenchimento	Argila dura		8	16,0%	
	Argila mole		7	14,0%	
	Rocha esmagada		20	40,0%	
	Nenhum		14	28,0%	
	Outro		1	2,0%	
Rugosidade	Denteada		39	78,0%	
	Ondulada		11	22,0%	
	Plana		0	0,0%	
	R ₁₋₂	Lisa	7	14,0%	
	R ₃	Algo rugosa	32	64,0%	
	R ₄₋₅	Muito rugosa	11	22,0%	
Continuidade	Muito pouco contínua		27	54,0%	
	Pouco contínua		17	34,0%	
	Medianamente contínua		6	12,0%	
	Contínua		0	0,0%	
Terminação	Descontinuidade		10	20,0%	
	Obscura		8	16,0%	
	Rocha		32	64,0%	
Curvatura	C ₁₋₂	Plana	25	50,0%	
	C ₃	Algo curva	20	40,0%	
	C ₄₋₅	Muito curva	5	10,0%	
Presença de Água	Seco		50	100,0%	
	Húmido		0	0,0%	
	Gotejante		0	0,0%	

4.4.4. Cartografia do zonamento geotécnico da exploração: uma proposta

A partir da organização dos dados geológico-geotécnicos, é possível definir uma proposta de cartografia de zonamento geotécnico (figura 55), a partir do qual é possível apresentar em três dimensões o modelo geotécnico a Pedreira do Poço Negro (figura 56).



Zonamento geotécnico (versão preliminar setembro de 2022)

Uso industrial: agregados

ZG1.A: Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfíróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W2 a W3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a próximas, com média no intervalo 10 a 60 cm (F3 a F4), com mediana de 30 cm (F3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 120 a 190 MPa (S2), com mediana de 154 MPa (S2).

ZG1.B: Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfíróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W2); ii) espaçamento das descontinuidades próximas a medianamente afastadas, com média no intervalo 20 a 80 cm (F3 a F2), com mediana de 40 cm (F3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 100 a 150 MPa (S2), com mediana de 121 MPa (S2).

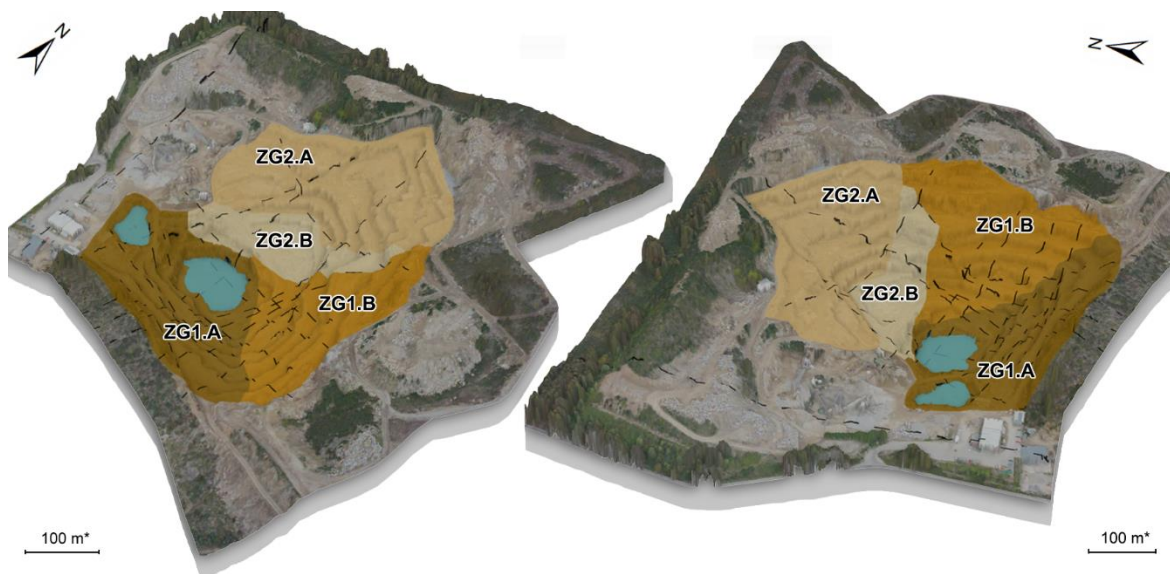
Uso industrial: ornamental

ZG2.A: Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfíróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W2); ii) espaçamento das descontinuidades muito a medianamente afastadas, com média no intervalo 30 a 195 cm (F3 a F2), com mediana de 80 cm (F2); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valores superiores a 250 MPa (S1).

ZG2.B: Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfíróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W2 a W3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a afastadas, com média no intervalo 20 a 100 cm (F3 a F2), com mediana de 39 cm (F3); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valor da mediana superior a 210 MPa (S1).

●—● SC - Scanline - - - Lineamentos foto-interpretados [Reserva de água]

Figura 55 - Proposta da cartografia de zonamento geotécnico (setembro de 2022) da Pedreira do Poço Negro.



*Escala aproximada

Zonamento geotécnico (versão preliminar setembro de 2022)

Uso industrial: agregados



ZG1.A: Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W2 a W3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a próximas, com média no intervalo 10 a 60 cm (F3 a F4), com mediana de 30 cm (F3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 120 a 190 MPa (S2), com mediana de 154 MPa (S2).



ZG1.B: Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W2); ii) espaçamento das descontinuidades próximas a medianamente afastadas, com média no intervalo 20 a 80 cm (F3 a F2), com mediana de 40 cm (F3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 100 a 150 MPa (S2), com mediana de 121 MPa (S2).

Uso industrial: ornamental



ZG2.A: Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W2); ii) espaçamento das descontinuidades muito a medianamente afastadas, com média no intervalo 30 a 195 cm (F3 a F2), com mediana de 80 cm (F2); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valores superiores a 250 MPa (S1).



ZG2.B: Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W2 a W3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a afastadas, com média no intervalo 20 a 100 cm (F3 a F2), com mediana de 39 cm (F3); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valor da mediana superior a 210 MPa (S1).

- - - Lineamentos foto-interpretados



Reserva de água

Figura 56 - Diferentes perspetivas da cartografia 3D do zonamento geotécnico da Pedreira do Poço Negro.

4.5. Blocometria e qualidade do maciço rochoso do Poço Negro

A blocometria retrata a dimensão e a forma dos blocos, aspetos que influenciam o comportamento, deformabilidade e atributos de resistência do maciço rochoso. De uma forma genérica, o bloco unitário define-se como um bloco tipo, que apresenta a forma e tamanho máximo expectável que é possível extrair do maciço rochoso. As suas características geométricas são influenciadas pela direção e orientação das principais famílias de descontinuidades, e o espaçamento médio entre si (figura 12 e quadros 5, 6 e 7). A continuidade, L (ISRM, 1978, 1981) é um fator também a ter em consideração para a estimativa do tamanho e forma do bloco. O quadro 41 apresenta uma síntese

dos índices blocométricos, em relação a cada (sub)zona geotécnica, com o cálculo do *Rock Quality Designation (RQD)* segundo as sugestões de Priest (1993) e de Palmström (2005).

Quadro 41 - Síntese dos índices blocométricos e aproximação do índice de qualidade da rocha (terminologia dos parâmetros adaptada de Priest & Hudson, 1976; ISRM, 1978, 1981; Priest, 1993; Palmström, 1995, 2005; BSI, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Zona geotécnica	ZG1.A	ZG1.B	ZG2.A	ZG2.B	Geral
Nº. descontinuidades	441	261	53	50	805
Espaçamento médio entre descontinuidades	47,59 cm	54,67 cm	173,08 cm	78,90 cm	58,07 cm
Tipo de exploração	Agregados		Ornamental		-
Threshold, t	1.0				
Índice dimensional, I_b	0,50 m	0,65 m	1,58 m	0,66 m	0,61 m
Tamanho dos blocos	Blocos de tamanho médio	Blocos grandes	Blocos grandes	Blocos grandes	Blocos grandes
Índice volumétrico, J_v	25,5 desc./m ³	17,5 desc./m ³	8,5 desc./m ³	12,8 desc./m ³	20,7 desc./m ³
Intervalo	24 - 30 desc./m ³	15 - 20 desc./m ³	6 - 10 desc./m ³	10 - 15 desc./m ³	18 - 23 desc./m ³
Tamanho dos blocos	Blocos pequenos a muito pequenos	Blocos pequenos	Blocos médios	Blocos médios a pequenos	Blocos pequenos
Frequência de descontinuidades, λ	2,10 m ⁻¹	1,83 m ⁻¹	0,58 m ⁻¹	1,27 m ⁻¹	1,72 m ⁻¹
Forma do bloco (ISRM, 1978)	Tabular	Tabular	Tabular	Tabular	Tabular
Classe	III	III	III	III	III
Forma do bloco (Palmström, 1995)	Prismática	Prismática	Prismática	Prismática	Prismática
<i>RQD</i> (Palmström, 2005)	46%	66%	89%	78%	58%
<i>TRQD</i> _{1.0} (Priest, 1993)	38%	45%	89%	64%	50%
Qualidade do maciço rochoso segundo o <i>RQD</i> (Deere et al., 1967)	Fraca	Fraca a razoável	Boa	Razoável	Fraca a razoável

Conclui-se que, a partir do índice volumétrico, J_v (ISRM, 1981), os blocos são, de uma forma geral, pequenos, excetuando na ZG2.A, onde estes são classificados como blocos de tamanho médio. Este índice está na base da estimativa do *RQD* segundo Palmström (2005), e depende, essencialmente, do espaçamento médio entre as famílias de descontinuidades, considerando as aleatórias e atribuindo um espaçamento médio entre elas. O índice dimensional, I_b (ISRM, 1978, 1981), trata-se de uma aproximação menos robusta à estimativa do tamanho dos blocos em comparação com o índice supramencionado (quadro 6), cujos cálculos indicam a presença de blocos grandes.

A forma do bloco interpreta também a continuidade do mesmo (ISRM, 1978, 1981), a qual foi considerada tabular nas subzonas ZG1.A, ZG1.B, ZG2.A e ZG2.B (ISRM, 1978). Contudo, Palmström (1995) sugeriu as formas de blocos apresentadas na figura 13, considerando que estes são geometricamente prismáticos em todas as subzonas geotécnicas.

Como referenciado, o *RQD* (Palmström, 2005) pode ser calculado empiricamente reconhecendo o valor do índice volumétrico. Este cálculo pode ser reafirmado pela proposta de Priest (1993), que sugere a ligação entre o espaçamento médio entre descontinuidades e um valor de 'threshold' (*limiar*), de modo a obter o parâmetro de qualidade de rocha (quadro 10). Assim, conclui-se que a subzona ZG2.A é a de melhor qualidade, com um *RQD* de 88,7% (Palmström, 2005) e um *TRQD*_{1.0} de 89% (Priest, 1993). A subzona ZG1.A apresenta uma qualidade de maciço rochoso fraca, cujo valor de *RQD* (Palmström, 2005) e *TRQD*_{1.0} (Priest, 1993) são de 46% e 38%, respectivamente.

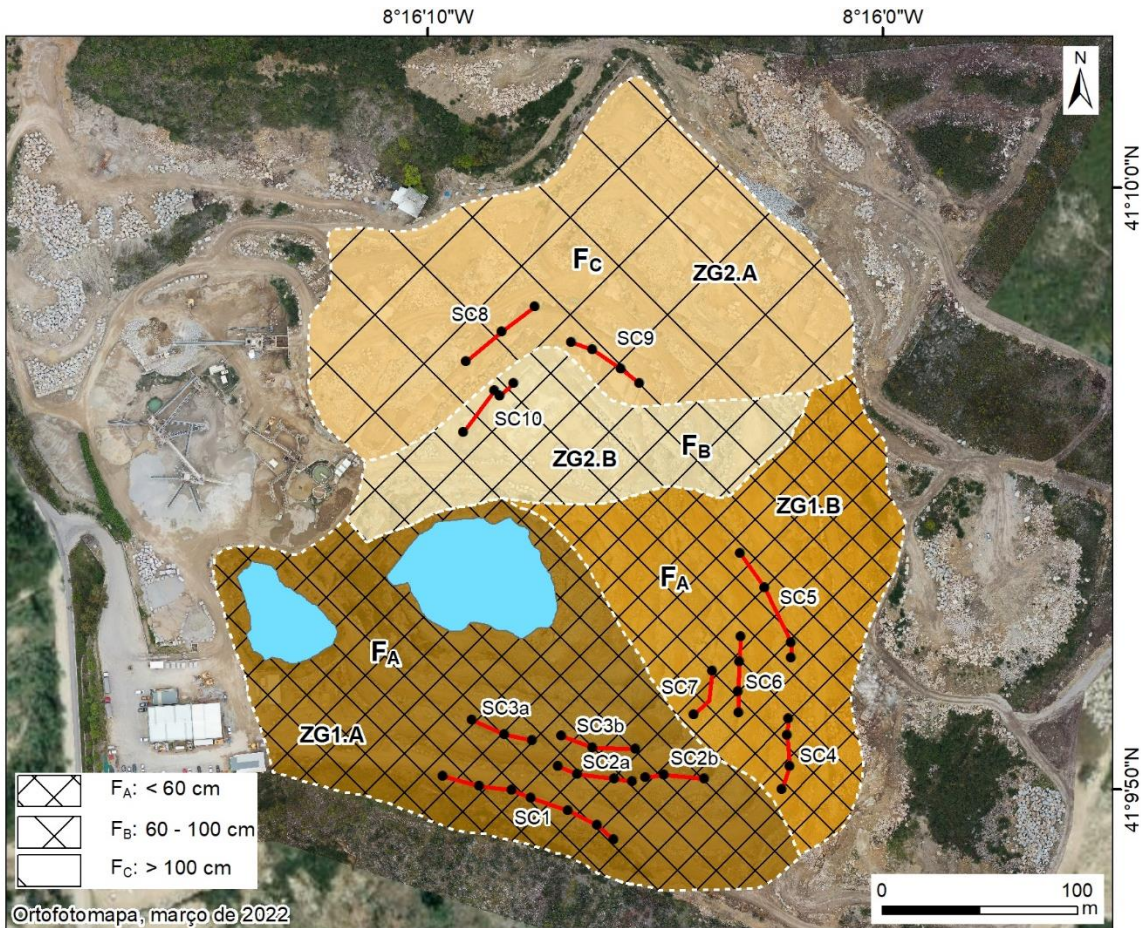
4.5.1. Proposta de zonamento blocométrico

Em adição à previsão das dimensões do bloco unitário, foi possível definir corredores de fraturação (F), que delimitam a área de exploração em zonas com um dado intervalo de fraturação. Esse corredor pode ser definido em três zonas blocométricas distintas, com as características e espaçamentos médios predominantes no quadro 42.

Quadro 42 - Proposta de zonamento blocométrico.

Zona blocométrica	Descrição (ISRM, 1978, 1981; Palmström, 1995)	Zona geotécnica
ZB1	Blocos pequenos a muito pequenos, de forma tabular (III) e prismática ($J_v = 15 - 30$ descontinuidades/m ³ ; $F_A < 60$ cm; $\lambda \approx 1,8 - 2,1$ m ⁻¹)	ZG1.A e ZG1.B
ZB2	Blocos pequenos, de forma tabular (III) e prismática ($J_v = 10 - 15$ descontinuidades/m ³ ; $F_B = 60 - 100$ cm; $\lambda \approx 1,3$ m ⁻¹)	ZG2.B
ZB3	Blocos de tamanho médio e de forma tabular (III) e prismática ($J_v = 6 - 10$ descontinuidades/m ³ ; $F_C > 100$ cm; $\lambda \approx 0,6$ m ⁻¹)	ZG2.A

A ZB1 trata-se da zona blocométrica mais fraturada, associada à ZG1.A e ZG1.B, cujo maciço rochoso apresenta um intervalo de 15 a 30 descontinuidades/m³ e um espaçamento médio (F_A) inferior a 60 cm. A ZB2 engloba a zona geotécnica ZG2.B, com um intervalo de 10 a 15 descontinuidades/m³ e um *Fracture Intercept* (ISRM, 1978, 1981) médio (F_B) compreendido entre 60 e 100 cm. Finalmente, a ZB3 abarca a área da exploração menos fraturada, com aproximadamente 6 a 10 descontinuidades/m³ e um espaçamento médio (F_C) superior a 100 cm. A cartografia de zonamento blocométrico proposto encontra-se sobreposta ao zonamento geotécnico na figura 57.



Zonamento geotécnico (versão preliminar setembro de 2022)

Uso industrial: agregados

ZG1.A: Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfíróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W2 a W3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a próximas, com média no intervalo 10 a 60 cm (F3 a F4), com mediana de 30 cm (F3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 120 a 190 MPa (S2), com mediana de 154 MPa (S2).

ZG1.B: Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfíróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W2); ii) espaçamento das descontinuidades próximas a medianamente afastadas, com média no intervalo 20 a 80 cm (F3 a F2), com mediana de 40 cm (F3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 100 a 150 MPa (S2), com mediana de 121 MPa (S2).

Uso industrial: ornamental

ZG2.A: Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfíróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W2); ii) espaçamento das descontinuidades muito a medianamente afastadas, com média no intervalo 30 a 195 cm (F3 a F2), com mediana de 80 cm (F2); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valores superiores a 250 MPa (S1).

ZG2.B: Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfíróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W2 a W3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a afastadas, com média no intervalo 20 a 100 cm (F3 a F2), com mediana de 39 cm (F3); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valor da mediana superior a 210 MPa (S1).

●—● SC - Scanline [Reserva de água]

Figura 57 - Proposta de intervalos de fraturação (zonamento blocométrico) sobreposto ao zonamento geotécnico.

4.6. Estudo geomecânico do maciço rochoso do Poço Negro

"The more clearly the immensely speculative nature of geological science is recognized, the easier it becomes to remodel our concepts of any inferred terrestrial conditions and processes in order to make outrages upon them not outrageous"

William Morris Davis (1926)

O estudo geomecânico do maciço rochoso permite avaliar alguns aspetos do comportamento mecânico do maciço rochoso, bem como a sua competência geral. O presente tópico destina-se à síntese das diversas classificações geomecânicas e índices geotécnicos, à sua respetiva explicação e à proposta da definição e cartografia do zonamento geomecânico.

4.6.1. Avaliação das condições e parâmetros geomecânicos: apresentação e discussão

A ferramenta geo-informática *MGC-RocDesign/CALC 1.0* (Pinheiro et al., 2014b; Chaminé et al., 2016) permitiu agilizar o cálculo e a aplicação das classificações geomecânicas *Rock Mass Rating – RMR* (Bieniawski, 1973, 1976, 1979, 1989, 1993, Celada & Bieniawski, 2020), *Q-system* (Barton et al., 1974, 1980; Barton, 2006; NGI, 2015) e *Surface Rock Classification – SRC* (González de Vallejo, 1983, 2003; González de Vallejo & Ferrer, 2011). Os índices geotécnicos *Rock Quality Designation – RQD* (Deere, 1963; Deere et al., 1967; Deere & Deere, 1988) e *Geological Strength Index - GSI* (e.g., Hoek & Brown, 1997; Hoek et al., 1998, 2013) foram obtidos por via analítica, e finalmente o *Rock Mass Index - RMI* (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2014) foi determinado através da calculadora *RMI/CALC* preparada no decurso deste trabalho. O quadro 43 identifica os resultados obtidos referentes aos diferentes índices geotécnicos e classificações geomecânicas.

Quadro 43 - Compilação dos resultados obtidos dos índices geotécnicos e classificações geomecânicas referentes às diferentes zonas.

Zona Geotécnica	ZG1.A	ZG1.B	ZG2.A	ZG2.B	Geral
Índices geotécnicos-geomecânicos					
<i>TRQD</i> _{1.0}	38%	45%	89%	64%	50%
Classificação	Fraca	Fraca a razoável	Boa	Razoável	Fraca a razoável
<i>GSI</i> 2013	41	48	67	56	47
Classificação	Fraca	Fraca a razoável	Razoável	Razoável	Fraca a razoável
<i>RMI</i> 2000	3,75	3,51	50,21	13,36	4,76
Classificação	Razoável	Razoável	Muito boa	Boa a razoável	Razoável
Classificações geomecânicas					
<i>RMR</i> 89	60	62	74	66	60
Intervalo	55 - 65	57 - 67	69 - 79	61 - 71	55 - 65
Classe	III - II	III - II	II	II	III - II
Classificação	Razoável a boa	Razoável a boa	Boa	Boa	Razoável a boa
<i>J_c</i> 89	15	17	15	16	15
<i>RMR</i> 14	68	70,2	83,4	74,6	68
<i>Q-system</i> 80	1,58	1,41	29,67	16,00	3,06
Classe	D	D	B	B	D
Classificação	Fraca	Fraca	Boa	Boa	Fraca
<i>SRC</i> 2003	36	43	63	58	43
Intervalo	31 - 41	38 - 48	58 - 68	53 - 63	38 - 48
Classe	IV	IV - III	III - II	III - II	IV - III
Classificação	Fraca	Fraca a razoável	Razoável a boa	Razoável a boa	Fraca a razoável

A ZG1.A é a zona com menor aptidão geotécnica. O seu índice de qualidade de rocha (*TRQD*_{1.0}) e *GSI* são de 38% e 41, respetivamente, resultando num maciço rochoso essencialmente fraco. O seu *RMI* é de 3,75, classificando o maciço rochoso como fraco. A nível de classificações geotécnicas, o *Rock Mass Rating* varia entre 55 e 65, transcrevendo para um maciço rochoso razoável a bom. O *Q-system* e *SRC* demonstram que a classificação da zona é fraca.

Os índices geotécnicos-geomecânicos demonstram a ZG1.B é fraca a razoável. Contudo, de acordo com as classificações geotécnicas, esta zona é classificada como fraca segundo o *Q-system*, fraca a razoável em conformidade com o *SRC* e razoável a boa em concordância com o *RMR*.

A ZG2.A pertence à exploração de rocha ornamental. As classificações geotécnicas apontam que o maciço rochoso é razoável a bom segundo o *SRC*, e bom, como classificado pelo *RMR* e *Q-system*. O índice geotécnico-geomecânico *GSI* indica que a subzona geotécnica é razoável, bom segundo o *TRQD*_{1.0} e muito bom de acordo com os cálculos efetuados para o *RMI*.

Finalmente, A ZG2.B, também fazendo parte da área explorada como rocha ornamental, é classificada como razoável a boa, de acordo com os índices e classificações geomecânicas, concluindo que se trata da subzona com maior concordância entre os mesmos.

O quadro 44 apresenta uma síntese dos resultados obtidos nas aplicações dos índices e classificações geomecânicas para cada zona, complementada pela figura 58, que apresenta uma representação dos mesmos em gráficos de radar.

Quadro 44 - Quadro síntese dos índices geotécnicos e classificações geomecânicas para cada zona geotécnica.

Zona Geotécnica	ZG1.A	ZG1.B	ZG2.A	ZG2.B	Geral
<i>GSI</i> 2013	41	48	67	56	47
<i>RMI</i> 2000	3,8	3,5	50,2	13,4	4,8
<i>RMR</i> 89	55 - 65	57 - 67	69 - 79	61 - 71	55 - 65
<i>Q-system</i> 80	1,6	1,4	29,7	16	3,1
<i>SRC</i> 2003	31 - 41	38 - 48	58 - 68	53 - 63	38 - 48

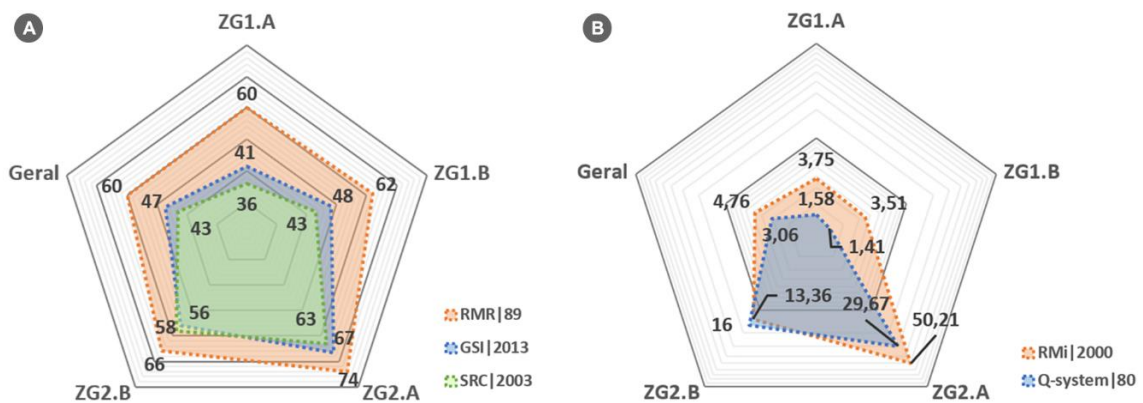


Figura 58 - Representação dos índices e classificações geomecânicas em gráficos de radares. A) Representação gráfica das classificações geomecânicas *RMR*/₈₉, *SRC*/₂₀₀₃ e índice geotécnico-geomecânico *GSI*/₂₀₁₃; B) Representação gráfica da classificação geomecânica *Q-system*/₈₀ e índice geotécnico-geomecânico *RMI*/₂₀₀₀ em escala logarítmica.

Constata-se, a partir dos quadros 43 e 44 e da Figura 58, que a subzona geotécnica ZG2.A destaca-se das restantes subzonas consequente dos resultados altos na aplicação dos índices e classificações geomecânicas.

O Anexo II apresenta o ábaco de *GSI* (Hoek & Brown, 1997; Hoek et al., 1998; Marinos & Hoek, 2000; Marinos et al., 2005) representativo das diferentes zonas geotécnicas.

A figura 59 apresenta uma comparação gráfica entre os diferentes índices e classificações geotécnicas de modo a determinar a relação entre elas.

Conclui-se que a correlação entre os índices e classificações geomecânicas é alta, com um coeficiente de determinação (R^2) superior a 80%, à exceção da relação entre o *RMI*/₂₀₀₀ e *SRC*, cujo R^2 é de aproximadamente 66%. Por outro lado, destaca-se a correlação entre o *GSI*/₂₀₁₃ e o *RMI*/₂₀₀₀, cujo R^2 é de 99,6%.

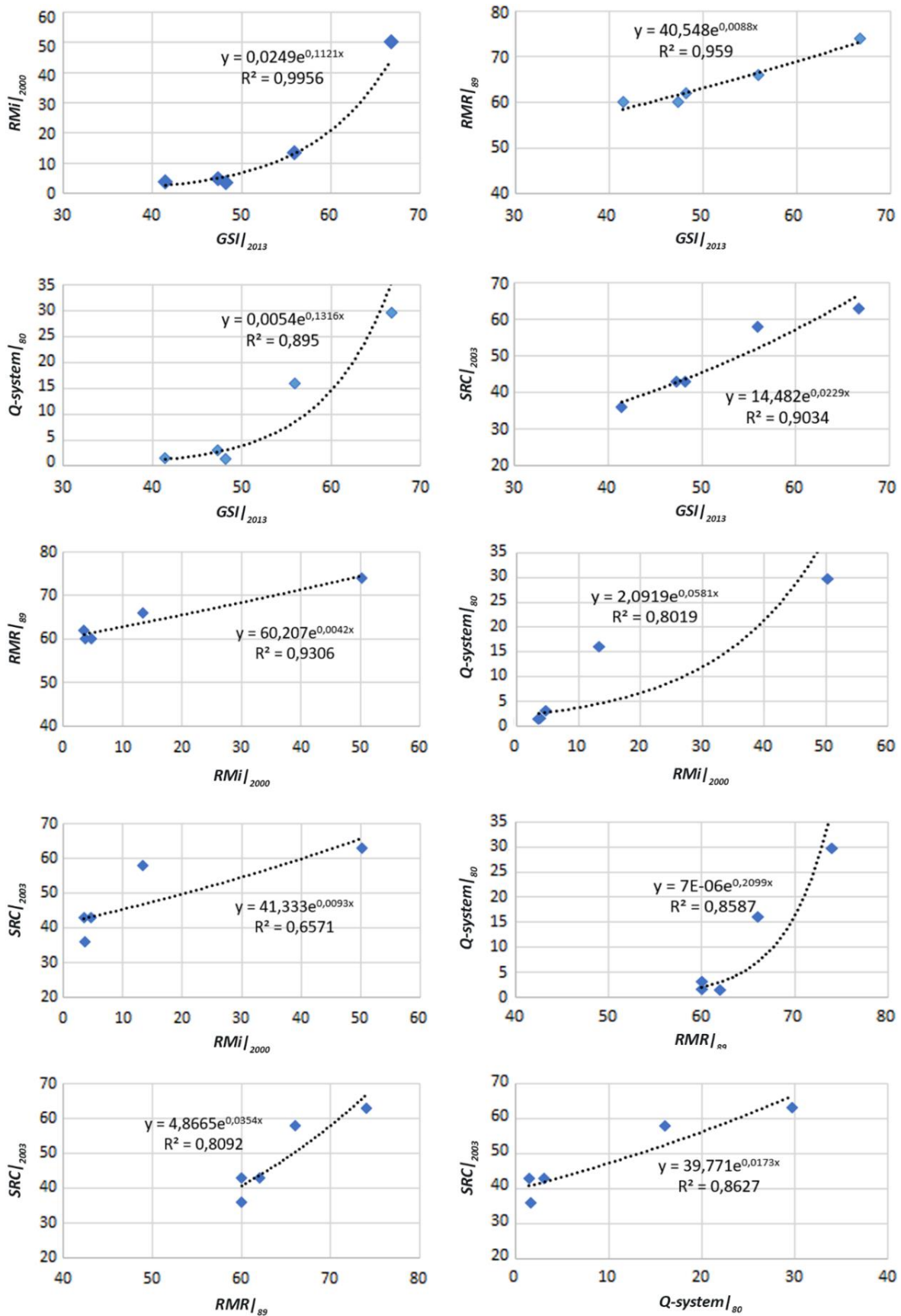


Figura 59 - Gráficos representativos das correlações entre os vários índices geotécnicos e classificações geomecânicas.

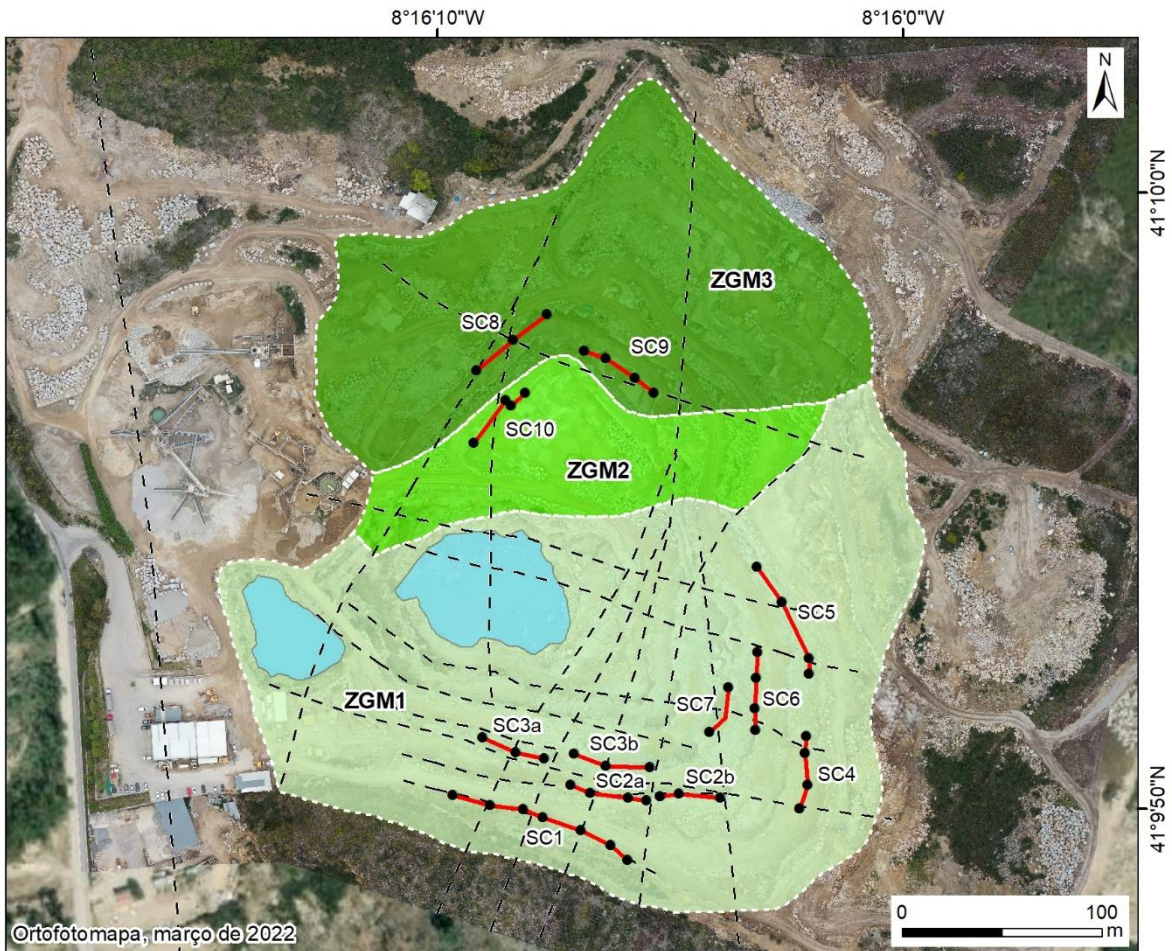
4.6.2. Definição e cartografia do zonamento geomecânico da exploração: uma proposta

Cruzando as informações relativamente aos índices geotécnicos e classificações geomecânicas, foi possível definir três zonas geomecânicas distintas: a ZGM1, composta pelas zonas geotécnicas ZG1.A e ZG1.B com finalidade industrial para agregados, a ZGM2 associada à ZG2.B com uso ornamental e a ZGM3 que integra a ZG1.A, destinada à extração de rocha ornamental. O quadro 45 apresenta as informações de cada ZGM sugerida e sua respectiva aptidão geomecânica.

Quadro 45 - Descrição e avaliação da sugestão de zonamento geomecânico.

Zona geomecânica	Descrição	Zona geotécnica	Uso industrial
ZGM1	Maciço rochoso granítico de fraca a razoável qualidade geomecânica (<i>TRQD</i> _{1.0} = 35 - 50%; <i>GSI</i> ₂₀₁₃ = 40 - 50; <i>RMi</i> ₂₀₀₀ = 3,5 - 3,75; <i>RMR</i> ₈₉ = 55 - 70; <i>Q-system</i> = 1,4 - 1,6; <i>SRC</i> = 35 - 45)	ZG1.A e ZG1.B	Agregados
ZGM2	Maciço rochoso granítico de boa a razoável qualidade geomecânica (<i>TRQD</i> _{1.0} = 60 - 70%; <i>GSI</i> ₂₀₁₃ = 56; <i>RMi</i> ₂₀₀₀ = 13,3; <i>RMR</i> ₈₉ = 61 - 71; <i>Q-system</i> = 16; <i>SRC</i> = 53 - 63)	ZG2.B	Ornamental
ZGM3	Maciço rochoso granítico de boa qualidade geomecânica (<i>TRQD</i> _{1.0} = 85 - 95%; <i>GSI</i> ₂₀₁₃ = 67; <i>RMi</i> ₂₀₀₀ = 50,2; <i>RMR</i> ₈₉ = 69 - 79; <i>Q-system</i> = 30; <i>SRC</i> = 58 - 68)	ZG2.A	

Baseando na informação descrita no quadro 45, foi possível realizar a cartografia de zonamento geomecânico (figura 60), e o respectivo modelo em três dimensões (figura 61).



Zonamento geomecânico (versão preliminar setembro de 2022)

Uso industrial: agregados

ZGM1: Maciço rochoso granítico de fraca a razoável qualidade geomecânica (TRQD_{1,0} = 35 - 50%; GSI₂₀₁₃ = 40 - 50; RMI₂₀₀₀ = 3,5 - 3,75; RMR₈₉ = 55 - 70; Q-system = 1,4 - 1,6; SRC = 35 - 45)

Uso industrial: ornamental

ZGM2: Maciço rochoso granítico de boa a razoável qualidade geomecânica (TRQD_{1,0} = 60 - 70%; GSI₂₀₁₃ = 56; RMI₂₀₀₀ = 13,3; RMR₈₉ = 61 - 71; Q-system = 16; SRC = 53 - 63)

ZGM3: Maciço rochoso granítico de boa qualidade geomecânica (TRQD_{1,0} = 85 - 95%; GSI₂₀₁₃ = 67; RMI₂₀₀₀ = 50,2; RMR₈₉ = 69 - 79; Q-system = 30; SRC = 58 - 68)

●—● SC - Scanline - - - Lineamentos foto-interpretados [Reserva de água]

Figura 60 - Proposta de cartografia de zonamento geomecânico.



*Escala aproximada

Zonamento geomecânico (versão preliminar setembro de 2022)

Uso industrial: agregados

ZGM1: Maciço rochoso granítico de fraca a razoável qualidade geomecânica (TRQD_{1,0} = 35 - 50%; GSI₂₀₁₃ = 40 - 50; RMI₂₀₀₀ = 3,5 - 3,75; RMR₈₉ = 55-70; Q-system = 1,4 - 1,6; SRC = 35 - 45)

Uso industrial: ornamental

ZGM2: Maciço rochoso granítico de boa a razoável qualidade geomecânica (TRQD_{1,0} = 60 - 70%; GSI₂₀₁₃ = 56; RMI₂₀₀₀ = 13,3; RMR₈₉ = 61 - 71; Q-system = 16; SRC = 53 - 63)

ZGM3: Maciço rochoso granítico de boa qualidade geomecânica (TRQD_{1,0} = 85 - 95%; GSI₂₀₁₃ = 67; RMI₂₀₀₀ = 50,2; RMR₈₉ = 69 - 79; Q-system = 30; SRC = 58 - 68)

- - - Lineamentos foto-interpretados Reserva de água

Figura 61 - Diferentes perspectivas da cartografia 3D do zonamento geomecânico da Pedreira do Poço Negro.

4.7. Avaliação do grau de compartimentação do maciço rochoso: implicações na gestão racional do georrecurso

O grau de compartimentação do maciço rochoso organizado por zona geotécnica encontra-se definido no quadro 41. A ZG2.A e ZG2.B encontram-se menos fraturadas que as restantes, comprovado pela densidade de descontinuidades (J_v), e são atualmente exploradas como rocha ornamental. Embora o volume do bloco já tenha sido calculado teoricamente para a definição do $RMI|_{2000}$ (Palmström, 1995, 1996a,b, 2000, 2009; Palmström & Stille, 2014), através do espaçamento médio das três principais famílias de descontinuidades (quadro 36), é vantajoso analisar esta grandeza a partir dos dados proveniente da análise estatística do espaçamento e da continuidade (quadro 35). Desta forma, é possível, para cada zona geotécnica, definir um volume do bloco mínimo, através dos valores mínimos de espaçamento e continuidade, médio, através da mediana dos mesmos valores, e máximo, considerando os valores superiores do intervalo. O

quadro 46 apresenta os volumes mínimos, médios e máximos para cada zona geotécnica, incluindo o volume teórico do bloco (equação 1).

Quadro 46 - Volumes de bloco mínimos, médio, máximos e teóricos para cada zona geotécnica e respetivo cálculo do peso expectável.

Zona Geotécnica	Valor	Largura	Altura	Comprimento	Volume	Massa volúmica do granito	Peso do bloco expectável
ZG1.A	Mínimo	0,10 m	0,43 m	0,50 m	0,02 m ³	2,65 ton/m ³	0,06 ton
	Médio	0,30 m	0,68 m	1,00 m	0,21 m ³		0,54 ton
	Máximo	0,60 m	1,07 m	1,50 m	0,96 m ³		2,54 ton
	Teórico	-	-	-	0,15 m ³		0,39 ton
ZG1.B	Mínimo	0,20 m	0,43 m	0,50 m	0,04 m ³		0,11 ton
	Médio	0,40 m	0,63 m	1,00 m	0,25 m ³		0,67 ton
	Máximo	0,80 m	1,07 m	1,50 m	1,28 m ³		3,39 ton
	Teórico	-	-	-	0,21 m ³		0,56 ton
ZG2.A	Mínimo	0,30 m	0,85 m	1,50 m	0,38 m ³		1,01 ton
	Médio	0,80 m	2,20 m	1,50 m	2,64 m ³		7,00 ton
	Máximo	1,95 m	3,20 m	1,50 m	9,36 m ³		24,80 ton
	Teórico	-	-	-	3,18 m ³		8,43 ton
ZG2.B	Mínimo	0,20 m	0,83 m	1,50 m	0,25 m ³		0,66 ton
	Médio	0,39 m	2,25 m	1,50 m	1,32 m ³		3,49 ton
	Máximo	1,10 m	3,30 m	1,50 m	5,45 m ³		14,43 ton
	Teórico	-	-	-	0,26 m ³		0,70 ton

No quadro 46 foi considerado um comprimento do bloco de 0,5, 1 ou 1,5 metros, interpretados por observação direta *in situ* e considerando a frequência de descontinuidades (λ) e o seu espaçamento (quadro 41). Foi também adotado uma massa volúmica do granito de 2,65 ton/m³ (quadro 2), podendo, a partir desses dados, determinar o peso expectável do bloco.

As dimensões e o respetivo volume do bloco em cada zona geotécnica podem ser observadas na figura 62.

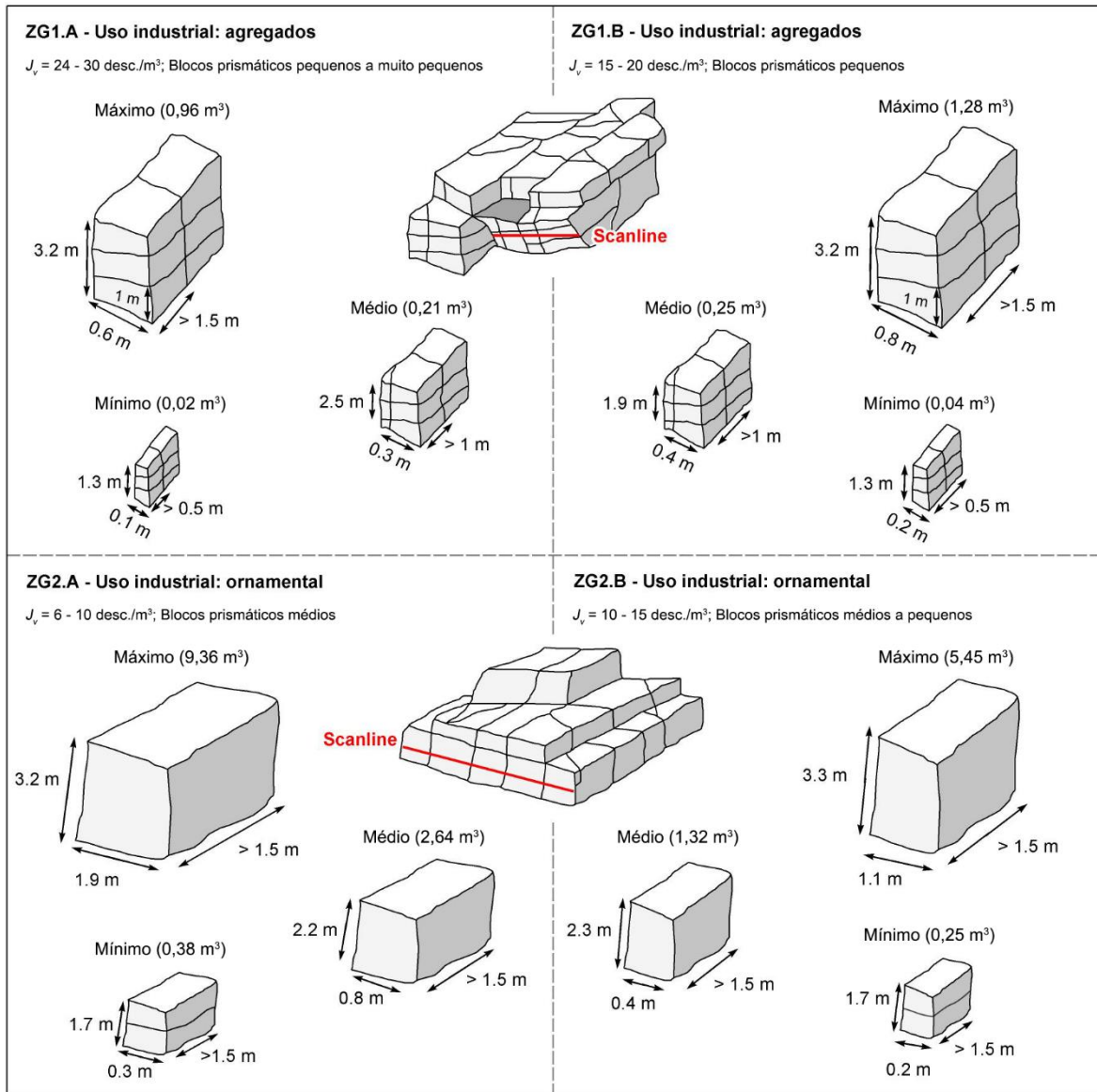


Figura 62 - Representação gráfica das dimensões mínimas, médias e máximas dos blocos expectáveis em cada zona geotécnica, com a respetiva volumetragem (representação esquemática do maciço rochoso adaptada de Palmström 1995).

Conclui-se, que nas zonas geotécnicas destinadas à produção de agregados (ZG1.A e ZG1.B), o volume mínimo do bloco varia entre 0,02 e 0,04 m³, e o volume do bloco máximo não ultrapassa 1,3 m³, ou 3,4 toneladas. Contudo, na ZG2.A, é possível extrair blocos com um volume superior a 9 m³, que traduz para um bloco de aproximadamente 24 toneladas.

Os responsáveis da Pedreira do Poço Negro (BRITAFIEL, S.A.) sugerem valores de referência, em toneladas (ton.), dos seis produtos comerciáveis de rocha ornamental. No quadro 47 estão disponíveis esses valores, cruzados com a tonelagem dos blocos expectáveis, calculados no quadro 46. O produto “macheado” pode-se enquadrar nas categorias de 3 a 7 ton., ou 7 a 12 ton., diferenciando-se das mesmas através da sua coloração, consequência do grau de alteração.

Quadro 47 - Correlação entre a sugestão de peso dos blocos ornamentais comerciáveis, pela BRITAFIEL, S.A. e o peso do bloco expectável por zona geotécnica de acordo com a geometria calculada.

Zona Geotécnica	Valor	Volume	Peso do bloco expectável	Pesos dos blocos ornamentais produzidos na pedreira (Valores de referência sugeridos pela Britafiel, S.A.)				
				Alvenaria	Bloco 2ª e Macheado	Bloco 1ª e Macheado	Serrado normal	Serrado "Barrenado"
				1 a 3 ton.	3 a 7 ton.	7 a 12 ton.	12 a 17 ton.	17 a 23 ton.
ZG1.A	Mínimo	0,02 m³	0,06 ton					
	Médio	0,21 m³	0,54 ton					
	Máximo	0,96 m³	2,54 ton	✓				
	Teórico	0,15 m³	0,39 ton					
ZG1.B	Mínimo	0,04 m³	0,11 ton					
	Médio	0,25 m³	0,67 ton					
	Máximo	1,28 m³	3,39 ton	✓	!			
	Teórico	0,21 m³	0,56 ton					
ZG2.A	Mínimo	0,38 m³	1,01 ton	✓				
	Médio	2,64 m³	7,00 ton	✓	✓	!		
	Máximo	9,36 m³	24,80 ton	✓	✓	✓	✓	✓
	Teórico	3,18 m³	8,43 ton	✓	✓	✓		
ZG2.B	Mínimo	0,25 m³	0,66 ton					
	Médio	1,32 m³	3,49 ton	✓	!			
	Máximo	5,45 m³	14,43 ton	✓	✓	✓	✓	
	Teórico	0,26 m³	0,70 ton					

Constata-se que, a ZG2.A é a zona geotécnica mais proveitosa a nível de rocha ornamental, sendo o seu bloco de tamanho máximo expectável apto para a cinco categorias sugeridas pela pedreira. O bloco médio, por outro lado, permite produzir até 7 toneladas, não sendo o seu aproveitamento recomendado para o intervalo de produção de 7 a 12 toneladas.

O bloco de tamanho máximo da ZG2.B, por outro lado, encaixa na totalidade das categorias à exceção da 17 a 23 toneladas. O bloco médio está limitado ao conjunto de 1 a 3 toneladas, sendo que o seu aproveitamento para a série seguinte pode ser incerto. O seu bloco de tamanho mínimo não se enquadra em qualquer intervalo de valores desejados.

Contudo, nas zonas destinadas à exploração de agregados (ZG1.A e ZG1.B), o bloco de tamanho máximo pode ser utilizado como bloco ornamental, enquadrando-se na classe mais baixa de produção, cujo peso varia entre 1 a 3 toneladas.

É de destacar que o volume do bloco estimado não corresponde ao intervalo de valores sugeridos por Toyos et al. (1994), a partir do índice volumétrico (J_v) como assinalado no quadro 7. Esta incongruência dever-se-á ao facto da densidade de descontinuidades (J_v), ter sido calculada para

toda a zona geotécnica, e não em pequenos setores de exploração. Estes intervalos propostos estão também direcionados para rocha ornamental, não devendo considerar esta correlação nas zonas geotécnicas destinadas à exploração de agregados. Mais tarde, Orche García (1996) propôs intervalos de J_v que indicam se o tamanho do bloco deve, ou não, ser comercializado como rocha ornamental (quadro 9), concluindo que, nenhuma rocha com índice volumétrico superior a 2,2 descontinuidades/m³ está apta para produzir blocos comerciais. Uma vez que a zona geotécnica com maior aptidão, a ZG2.A, possui um J_v compreendido entre 6 e 10 descontinuidades/m³, tratando-se de blocos de tamanho médio, a sugestão de Orche García (1996) aponta que a rocha apresenta tamanhos inconcebíveis para o uso ornamental. Para tal, procedeu-se à estimativa do *Granite Fracturing Index (GFI)* proposto por Sousa (2007), para determinar se o método de exploração do maciço rochoso representativo da ZG2.A e ZG2.B é inadequado, ou não.

4.7.1. Estimativa do índice de fraturação do granito (GFI)

O *Granite Fracturing Index, GFI* (Sousa, 2007) é uma aproximação às características do maciço rochoso que avalia se a rocha é apta, ou não, para uso ornamental, admitindo que se trata de uma rocha pouco fraturada e de qualidade excepcional. Este índice foi aplicado com a expectativa que os resultados (quadro 48) tendessem negativamente, baseado no índice volumétrico, na mediana de espaçamento e no número de famílias de descontinuidades.

Quadro 48 - Estimativa do *Granite Fracturing Index (GFI)* para as diferentes zonas geotécnicas.

Zona geotécnica	ZG1.A	ZG1.B	ZG2.A	ZG2.B	Geral
Número de descontinuidades	441	261	53	50	805
Índice volumétrico (J_v)	25,5 desc./m ³	17,5 desc./m ³	8,5 desc./m ³	12,8 desc./m ³	20,7 desc./m ³
Núm. famílias de descontinuidades (J_n)	4	4	3	3	4
Espaçamento (J_s)	0,30 m	0,40 m	0,80 m	0,39 m	0,35 m
Comprimento das descontinuidades (J_l)	2,05 m	1,90 m	2,20 m	2,25 m	2,00 m
Terminação em maciço rochoso (N_R)	162	106	34	32	334
Índice de terminação (J_p)	18%	20%	32%	32%	21%
<i>Granite Fracture Index (GFI)</i>	-0,431	-0,118	0,471	0,078	-0,250

É possível concluir que o índice representativo da ZG1.A aponta para um maciço de fraca qualidade geológico-geotécnica em termos de ornamental, e que as subzonas ZG1.B e ZG2.B aproximam-se bastante de 0, que representa um maciço de qualidade média.

Contudo, a ZG2.A apresenta um resultado bastante positivo, e que, apesar do valor de índice volumétrico poder ser considerado alto, e o espaçamento baixo, resultou num *GFI* de 0,47, afirmando que esta subzona apresenta atributos para a produção de rocha ornamental.

No entanto, se o maciço rochoso fosse estudado na sua globalidade, o *GFI* aproximava-se de -0,25, o que excluiria a possibilidade de exploração de rocha ornamental, pelo que é de interesse dividir a zona de estudo em setores ou áreas.

4.7.2. Considerações finais

O histórico do comércio de blocos de rocha ornamental da BRITAFIEL, S.A.³ indica que este método de extração com fio diamantado resulta num aproveitamento médio de 20% a 30%. Em termos práticos, e partindo dos resultados demonstrados no quadro 47, na expectativa de extração de um bloco de tamanho máximo (24,8 ton), será aproveitado, em média, a tonelagem equivalente a um bloco de tamanho médio (7,0 ton). Estas perdas de qualidade devem-se, geralmente, às variações no grau de fraturação, microfissuração, foliações e clivagens, concentração de minerais e encraves, grau de alterabilidade e suscetibilidade textural à oxidação e manchas.

A percentagem de rejeito (\approx 80 a 70%), é redirecionada para a central de britagem, aproveitando-o para a produção de agregado. Todavia, o referido aproveitamento de rocha ornamental é economicamente viável para a empresa (resultando em seis produtos que variam em termos de qualidade e valor económico, ou seja, o produto mais valioso 55€/ton+IVA e o produto menos valorizado atingindo 5,5€/ton+IVA).

³ Informação gentilmente cedida pelo Eng.º Rui dos Santos Silva (BRITAFIEL, S.A.).

Capítulo V

Conclusões

Conclusões

5.1.

Considerações finais

5.2.

Perspetivas futuras

(página propositadamente em branco)

5. Conclusões

"Engineering is a living branch of human activity and its frontiers are by no means exhausted"

Igor I. Sikorsky (1889 - 1972)

5.1. Considerações finais

O foco da presente dissertação de mestrado foi a divisão da área licenciada para a exploração da Pedreira do Poço Negro (Duas Igrejas, Penafiel, Porto) em zonas geotécnicas e geomecânicas orientadas para a gestão do georrecurso. Essa divisão foi possível através de um estudo de campo consistindo na aplicação da técnica da amostragem linear, com o intuito de cartografar e estudar o maciço rochoso quanto às suas características geológico-geotécnicas de acordo com as propostas da ISRM (1978, 1981) e de ensaios esclerométricos recorrendo ao martelo de *Schmidt*, que permitiu estimar a resistência à compressão uniaxial do mesmo.

As investigações sobre a compartimentação do maciço rochoso foram o primeiro passo para o trabalho de gabinete, onde foi aplicada e atualizada a *SCANGEO-DATA/BGD* (Anexo III) e *SCHMIDT-DATA/UCS* versão 3.0. A junção dinâmica e intuitiva, e análise estatística dos dados geológico-geotécnicos e geomecânicos permitiram definir quatro subzonas geotécnicas (quadro 34 e Anexo IV):

- **ZG1.A:** Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W_2 a W_3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a próximas, com média no intervalo 10 a 60 cm (F_3 a F_4), com mediana de 30 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 120 a 190 MPa (S_2), com mediana de 154 MPa (S_2);
- **ZG1.B:** Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W_2); ii) espaçamento das descontinuidades próximas a medianamente afastadas, com média no intervalo 20 a 80 cm (F_3 a F_2), com mediana de 40 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 100 a 150 MPa (S_2), com mediana de 121 MPa (S_2);
- **ZG2.A:** Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W_2); ii) espaçamento das descontinuidades muito a medianamente afastadas, com média no intervalo 30 a 195 cm (F_3 a F_2), com mediana de 80 cm (F_2); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valores superiores a 250 MPa (S_1);

• **ZG2.B:** Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W_2 a W_3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a afastadas, com média no intervalo 20 a 100 cm (F_3 a F_2), com mediana de 39 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valor da mediana superior a 210 MPa (S_1).

As subzonas ZG1.A e ZG1.B tratam-se de áreas destinadas à exploração de agregados, e englobam 87% das descontinuidades estudadas. As restantes subzonas, a ZG2.A e ZG2.B orientam-se para a exploração de rocha ornamental, embora a ZG2.B se trate de um setor de transição de rocha fraturada (ZG1), para uma rocha mais sã e mais resistente (ZG2.A). Embora não referenciada nos mapas, foi proposta uma zona geotécnica indicada para locais inaptos para exploração (ZG0), consistindo essencialmente por terra vegetal, rocha granítica muito alterada a decomposta (W_{4-5}) e de resistência muito baixa (S_{4-5}).

Foram aplicados vários índices geotécnicos e classificações geomecânicas com o auxílio da ferramenta geo-informática *MGC-RocDesign/CALC 1.0*, e com o desenvolvimento, no âmbito desta dissertação, de uma nova calculadora destinada à estimativa do $RMI|_{2000}$ e da respetiva proposta de sustimento de um túnel (*RMI-CALC*). Desta forma, foi possível definir três zonas geomecânicas (quadro 45):

- **ZGM1:** Maciço rochoso granítico de fraca a razoável qualidade geomecânica ($TRQD_{1.0} = 35 - 50\%$; $GSI|_{2013} = 40 - 50$; $RMI|_{2000} = 3,5 - 3,75$; $RMR|_{89} = 55 - 70$; $Q\text{-system} = 1,4 - 1,6$; $SRC = 35 - 45$);
- **ZGM2:** Maciço rochoso granítico de boa a razoável qualidade geomecânica ($TRQD_{1.0} = 60 - 70\%$; $GSI|_{2013} = 56$; $RMI|_{2000} = 13,3$; $RMR|_{89} = 61 - 71$; $Q\text{-system} = 16$; $SRC = 53 - 63$);
- **ZGM3:** Maciço rochoso granítico de boa qualidade geomecânica ($TRQD_{1.0} = 85 - 95\%$; $GSI|_{2013} = 67$; $RMI|_{2000} = 50,2$; $RMR|_{89} = 69 - 79$; $Q\text{-system} = 30$; $SRC = 58 - 68$).

Com a finalidade de caracterizar o maciço rochoso quanto à sua qualidade, o zonamento geotécnico e geomecânico foi complementado com um estudo da compartimentação do mesmo. Para tal, estimaram-se os índices blocométricos e foi aplicada a classificação *GFI – Granite Fracturing Index*. Embora o índice volumétrico e a densidade de descontinuidades aparentem ser desfavoráveis na ZG2.A, o *GFI* resultou em 0,47, determinando que este local tem potencialidades para ser explorado como rocha ornamental. Uma estimativa dos volumes mínimos, médios e máximos possíveis de extrair em cada zona comprova que a ZG2.A tem aptidão para extrair os blocos de maior peso, entre 17 e 23 toneladas, de acordo com os valores de referência da Pedreira do Poço Negro. A ZG2.B, embora com a possibilidade de extrair blocos até 14,4 toneladas, trata-se de uma zona de transição entre a rocha mais apta (ZG2.A) e rocha mais fraturada e menos resistente (ZG1.A e ZG1.B), apesar

de se encontrar a uma cota mais baixa, não apresentando as competências ideais para a extração de rocha ornamental.

A ZG1.A e ZG1.B, por outro lado, destina-se à extração de agregados, onde a dimensão ideal do bloco é bastante próxima à do produto desejado de modo a reduzir os custos na etapa de fragmentação. O bloco de tamanho máximo de ambas as subzonas é, contudo, superior a 2,5 toneladas, enquadrando-se na classe de blocos ornamentais compreendidos entre 1 e 3 toneladas.

5.2. Perspetivas futuras

A área de exploração da Pedreira do Poço Negro irá aumentar após o licenciamento. Desta forma, o foco das perspetivas futuras são relativas a essa área, iniciando com a aplicação da técnica da amostragem linear e uma cartografia de zonamento geotécnica desse novo sector da pedreira. Previamente à proposta de zonamento geotécnico do novo local para exploração, este deve ser dividido em pequenos setores, como por exemplo, uma scanline, de modo a calcular o índice volumétrico e posteriormente a aplicação do índice *GFI*. A organização dos dados em curtas secções permite avaliar mais detalhadamente o local, quanto à sua aptidão para a exploração de rocha ornamental. Seguidamente, dever-se-á seguir o processo, iniciando na organização dos dados geológico-geotécnicos por patamar, recorrendo à *SCANGEO-DATA/BGD v3.0*.

No local estudado, foram levantadas algumas incertezas relativamente à proposta de zonamento geotécnico. Foi difícil prever onde estas terminavam, principalmente na zona de transição da área destinada à exploração de agregados e rocha ornamental. Para tal, seria de valorizar a realização de ‘*scanlines*’ complementares, de modo a fundamentar a informação já estudada. Finalmente, é recomendada a recolha de amostras para a realização do ensaio de carga pontual (*PLT*), para complementar o ensaio esclerométrico realizado em campo.

Por fim, é sugerida a criação e desenvolvimento de um aplicativo (tipo “app”) para dispositivos móveis (e.g., smartphone, iPad) com o intuito de caracterizar e avaliar, de forma expedita, as condições geológico-geotécnicas e geomecânicas das frentes das bancadas da pedreira.

(página propositadamente em branco)

Capítulo VI

Referências bibliográficas

(página propositadamente em branco)

Referências bibliográficas

- Abad, J., Caleda, B., Chacon, E., Gutierrez, V., Hidlgo, E. (1984). Application of geomechanical classification to predict the convergence of coal mine galleries and to design their supports. In: 5th Int. Congress on Rock Mech., Melbourne, pp. 15–19.
- Arctur, D., Zeiler, M. (2004). Designing geodatabases: case studies in GIS data modelling. ESRI Press, Redlands, 380 pp.
- Aydin, A. (2015). ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version. In: Ulusay R. (ed.), The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. Springer, Cham, Heidelberg, p. 25-33.
- Aydin, A., Basu, A. (2005). The Schmidt hammer in rock material characterization. Engineering Geology, 41:1211-14.
- Bar, N., Barton, N. (2017). The Q-slope Method for Rock Slope Engineering. Rock Mechanics and Rock Engineering 50, pp. 3307-3322.
- Bar, N., McQuillan, A. (2021). Q-slope application to coal mine stability. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 833(1), 012043.
- Barton, N. (1995). The Influence of Joint Properties in Modelling Jointed Rock Masses, Keynote Lecture, 8th Congress of ISRM, Tokyo, vol. 3, Rotterdam, Balkema.
- Barton, N. (1999). TBM performance estimation in rock using Q-tbm. Tunnels and Tunnelling International, Sept. 1999, pp. 30-34.
- Barton, N. (2000). TBM tunnelling in jointed and faulted rock. Balkema, Rotterdam. 173 pp.
- Barton, N. (2006). Rock quality, seismic velocity, attenuation, and anisotropy. Taylor & Francis, UK. 729 pp.
- Barton, N. (2012). Reducing risk in long deep tunnels by using TBM and drill-and-blast methods in the same project – the hybrid solution. J. Rock Mech. and Geotech. Eng., 4(2): 115-126.
- Barton, N., (1995). The Influence of Joint Properties in Modelling Jointed Rock Masses, Keynote Lecture, 8th Congress of ISRM, Tokyo, vol. 3, Rotterdam, Balkema.
- Barton, N., Bar, N. (2015). Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects Future Development of Rock Mechanics; Proc. ISRM Regional Symposium Eurock 2015 & 64th Geomechanics Colloquium, Salzburg, Austria, pp. 157-162.
- Barton, N., Bieniawski, Z.T. (2008). RMR and Q-setting records straight. Tunnels and Tunnelling International, Feb. 2008, pp. 26-29.
- Barton, N., Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics, 1/2: 1-54.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, 6(4): 189-239.
- Barton, N., Loset, F., Lien, R., Lunde, J. (1980). Application of Q-system in design decisions concerning dimensions and appropriate support for underground installations. In: M. Bergman (Ed.), Proceedings, Subsurface Space, ISRM International Symposium – Rockstore'80, Stockholm. Pergamon Press Ltd., 2: 553-561.
- Barton, N., Quadros, E. (2015). Anisotropy is everywhere, to see, to measure and to model. Rock Mech Roc Eng 48:1323–1339.
- Bateira, C. (2001). Movimentos de Vertente no NW de Portugal, Susceptibilidade Geomorfológica. Faculdade de Letras da Universidade do Porto, FLUP, Porto. (Tese de Doutoramento).
- Berry, J.K. (1987). Fundamental operations in computer assisted map analysis. Internations Journal of Geographical Information Systems 1: 119-36.
- Bieniawski Z.T. (1978): Determining rock mass deformability: Experience from case histories. Int. J. Rock Mechanics Mineral Science & Geomechanics Abstracts, 15:237 – 247.
- Bieniawski, Z. T., Celada, B., Galera, J. M., Tardáguila, I. (2008). New applications of the excavability index for selection of TBM types and predicting their performance. World Tunnel Congress 2008 - Underground Facilities for Better Environment and Safety – India.
- Bieniawski, Z.T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. Transactions of the South African Institution of Civil Engineers, 15: 335-344.
- 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.

-
- Bieniawski, Z.T. (1979). The geomechanics classification in rock engineering applications. In: Proceedings of the 4th Congress International Symposium of Rock Mechanics, Montreux, 2: 41–48.
- Bieniawski, Z.T. (1984). Rock Mechanics Design in Mining and Tunnelling. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering rock mass classifications. Wiley, New York. 251 p.
- Bieniawski, Z.T. (1993). Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends. In: J.A. Hudson (Ed.), Comprehensive rock engineering: principles, practice, and projects. Pergamon Press, 33:553-574.
- Bieniawski, Z.T., Celada, B., Galera, J.M. (2007). Predicting TBM excavability. Tunnels and Tunnelling International. pp. 25-28.
- Bieniawski, Z.T., Celada, B., Galera, J.M., Álvares, M. (2006). Rock Mass Excavability (RME) index. In: Proceedings of the ITA World Tunnelling Congress, Korea. June 2006, paper #06-0254.
- Brady, B.H.G., Brown, E.T. (2007). Rock mechanics for underground mining. Kulwer Academic Publishers, Dordrecht. 628 pp.
- Brown, E.T. (1991). Da teoria à prática em mecânica das rochas. Ingenium, Revista da Ordem dos Engenheiros, Ano IV (48): 9-29.
- BSI (2003). BS EN ISO 14689-1. Geotechnical investigation and testing. Identification and classification of rock. British Standard Institution. London.
- Burrough, P.A. (1986). Principles of Geographic Information Systems for Land Resources Assessment. Clarendon, Oxford.
- Cai, M., Kaiser, P. K., Uno, H., Tasaka, Y., Minami, M. (2004). Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41: 3–19.
- Cameron-Clarke, I.S., Budavari, S. (1981). Correlation of rock mass classification parameters obtained from bore core and in situ observations. Engineering Geology, 17. pp. 19-53.
- Cardella, D. (2021). Esri Introduces ArcGIS Platform. <https://www.esri.com/about/newsroom/arcwatch/esri-introduces-arcgis-platform/> (Consultado em 29 de abril de 2022).
- Cargill, J.S., Shakoor, A. (1990). Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 53:97-103.
- Celada, B., Bieniawski, Z. T. (2020). Ground characterization and structural analyses for tunnel design. CRC Press, Boca Raton, 454 pp.
- Celada, B., Tardáguila, I., Rodríguez, A., Varona, P., Bieniawski, Z.T. (2014). Actualización y mejora del RMR. IGP – InGeoPress, 234: 18-22.
- CFCFF – Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow (1996). Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications. National Research Council, National Academy Press, USA.
- Chaminé, H.I. (2016). Técnicas de amostragem em estudos de maciços rochosos fracturados: importância na prática da geologia estrutural, geociências de engenharia e mecânica das rochas. In: H.I. Chaminé, M.J. Afonso, A.C. Galiza (eds.), Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor – Uma Homenagem. Coleção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 297-343.
- 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. 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., Silva, R., Monteiro, R., Teixeira, J., Moreira, P., Meixedo, J.P., Trigo, J.F. (2010). Da teoria à prática em geotecnia urbana de maciços rochosos: o exemplo da zona ribeirinha de Gaia. Tecnologia e Vida, Revista da Secção Regional do Norte da ANET, Porto, 6: 39-45.
- 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 Journal, 36:27-33.
- Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Trigo, J.F., Freitas, L., Ramos, L., Carvalho, J.M. (2021). Site appraisal in fractured rock media: coupling engineering geological mapping and geotechnical modelling. European Geologist Journal, 51:31-38.
-

-
- Chaminé, H.I., Fernandes, I. (2023). The role of engineering geology mapping and GIS-based tools in geotechnical practice. In: Chastre C., Neves J., Ribeiro D., Neves M.G., Faria P. (eds.), *Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering*. Springer Tracts in Civil Engineering. Springer, Cham, p. 3–27.
- 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 e Trabalhos*, Instituto Geológico Mineiro, Porto, 37: 97-111.
- Chaminé, H.I., Pinheiro, R., Meirinhos, J., Santa, C., Pereira, R., Silva, R.S., Moreira, P., Madureira, M.M., Martins, A., Fonseca, L., Ramos, L. (2016). Aplicativos informáticos para análise e avaliação de dados de campo em geociências de engenharia, geotecnia e hidrogeomecânica de maciços rochosos fracturados: MGC-RocDesign|Calc e GeoTech|CalcTools. In: H.I. Chaminé, M.J. Afonso, A.C. Galiza (eds.), Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor – Uma Homenagem. Coleção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 345 – 377.
- Chen, P.P. (1977). The entity-relationship model - A basis for the enterprise view of data. National Computer Conference. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts, pp. 8.
- CIGeoE – Centro de Informação Geoespacial do Exército (2012). Carta Militar de Portugal, à escala 1/25.000, Série M888: folha 124 (Marco de Canaveses).
- Clerici, A. (1993). Indirect determination of the modulus of deformation of rock masses - Case histories. Proc. Conf. Eurock '1993, pp. 509 - 517.
- Cosgrove, J.W., Hudson, J.A. (2016). *Structural geology and rock engineering*. Imperial College Press, London.
- de Freitas, M.H. (2009). Geology: its principles, practice, and potential for geotechnics. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 42: 397-441.
- Dearman, W. R. (1991). *Engineering geological mapping*. Butterworth, Heinemann Ltd., Oxford.
- Deere, D.U. (1963). Technical description of rock cores for engineering purposes. *Felsmechanik und Ingenieurgeologie / Rock Mech Eng Geol* 1(1): 17–22.
- 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, STP984: 91-101.
- Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D., Cording, E.J. (1967). Design of surface and near surface construction in rock. In: Fairhurst C. (ed.), *Failure and Breakage of Rock*, Proceedings of the 8th U. S. symposium rock mechanics, Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrol. Engrs., p. 237-302.
- Deere, D.U., Miller, R.P. (1966). *Engineering Classification and Index Properties of Rock*, Technical Report Air Force Weapons Laboratory, New Mexico, p. 65-116.
- Dias, G.; Noronha, F., Ferreira, N. [eds.] (2000). Variscan plutonism in the Central Iberian Zone, Northern Portugal. *Eurogranites'2000 Field Meeting Guidebook*, UM/FCUP/IGM.
- Dinis da Gama, C. (1995). Aspectos geotécnicos y de fracturación de las rocas ornamentales. In: C. López Jimeno (Ed.), *Capítulo 10 – Manual de Rocas Ornamentales*. Entorno Gráfico SL, Madrid, p. 231-246.
- Dinis da Gama, C., Afonso, J.C. (1993). Applications of scan-lines techniques for fracture analysis in marble quarries. *Proceedings Eurorock'93*, A.A. Balkema, volume 1.
- Dobereiner, L, de Freitas, M.H. (1986). Geotechnical properties of weak sandstones. *Géotechnique*, 36(1):79-94.
- Elements of geographic information (2009). https://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Elements_of_geographic_information (consultado em 29 de abril de 2022).
- Farmer, I.W. (1968). *Engineering properties of rocks*. Spon Ltd., London.
- Fereidooni, D., Khanlari, G.R., Heidari, M. (2015). Assessment of a modified rock mass classification system for rock slope stability analysis in the Q-system. *Earth Sciences Research Journal*: 19(2): 147-152.
- Fernandes, I., Chaminé, H.I. (2023). In situ geotechnical investigations. In: Chastre C., Neves J., Ribeiro D., Neves M.G., Faria P. (eds.), *Advances on Testing and Experimentation in Civil Engineering*. Springer Tracts in Civil Engineering. Springer, Cham, p. 29–54.
- Fonseca, L. (2008). *Interação e avaliação entre o maciço rochoso e as tecnologias de perfuração: consequências técnico-económicas*. Dissertação de mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
-

-
- 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 pp. (CD-ROM).
- Galiza, A.C. (2013). Qualidade e optimização do desmonte de maciços rochosos em geotecnia mineira. Tese de doutoramento. Universidade de Aveiro, Aveiro. URI: <http://hdl.handle.net/10773/11626>.
- Galiza, A.C., Ramos, L., Fonseca, L., Chaminé, H.I. (2011). Geotecnia mineira de maciços rochosos fracturados para o controlo da qualidade do desmonte. *Revista Ingenium da Ordem dos Engenheiros*, 124 (Jul/Agos): 76-80.
- García, E.O. (1996). Investigación de yacimientos. In: Jimeno, C.L., *Manual de Roca Ornamentales* (1996). Entorno Grafico, Madrid, pp. 139-174.
- Gates, W.C.B. (1997). The hydro-potential value: a rock classification technique for examination of groundwater potential in fractured bedrock. *Environmental Engineering and Geoscience*, 3: 231-267.
- Gates, W.C.B. (2003). The Hydro-Potential (HP) Value: a rock classification technique for estimating seepage into excavations. In: Culligan, P.J., Einstein, H.H., Whittle, A.J., eds, *Proceedings, 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 1283-1290.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Prentice Hall, Madrid. 715 pp.
- González de Vallejo, L.I. (1983). A new classification system for underground assessment using surface data. *Proceedings of the International Congress of Engineering Geology and Underground Construction*, Lisbon, 1 (II): 85-94.
- González de Vallejo, L.I. (2003). SRC Rock Mass Classification of tunnels under high tectonic stress excavated in weak rocks. *Engineering Geology*, 69: 273-285.
- Gonzalez de Vallejo, L.I., Ferrer, M. (2011). *Geological engineering*. CRC Press, Taylor-Francis group, 725 pp.
- Goodman, R.E. (1976). *Methods of geological engineering in discontinuous rocks*. West Publish-ing Company, New York.
- Goodman, R.E. (1989). *Introduction to rock mechanics*. Ed. John Wiley & Sons.
- Griffiths, J.S. (2002). Mapping in engineering geology. *The Geological Society of London, Key issues in Earth Sciences*. Pp. 7-79.
- Griffiths, J.S. (2014). Feet on the ground: engineering geology past, present and future. *Quarterly Journal Engineering Geology and Hydrogeology* 47(2):116–143.
- Grimstad, E., Barton, N. (1993). Updating of the Q-system for NMT. In: Jompen, Opsahl & Berg, (eds.), *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete: Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*. Norwegian Concrete Association, Oslo. p. 46-66.
- Grimstad, E., Bhasin, R., Wold Hagen, A., Kaynia, A., Kankes, K. (2003). Q-system advance for sprayed lining, Parts 1 and 2, *Tunnels and Tunnelling International*, Jan. 44-47, and March, 2003.
- GSE - Geological Society Engineering Group Working Party Report (1995). The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 28 (3): 207-242.
- GSL – Geological Society of London (1972). The preparation of maps and plans in terms of engineering geology. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 5:297-367.
- Hencher, S. (2015). *Practical rock mechanics*. Spon Press, Taylor & Francis Group, Abingdon. 378 pp.
- Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses, *ISRM News Journal*, 2(2), pp. 4-16.
- Hoek, E. (2007). *Practical rock engineering*. RocScience: Hoek's Corner, 342 p.
- Hoek, E., Brown, E.T. (1980a). Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Engng Div., ASCE* 106(GT9), 1013-1035.
- Hoek, E., Brown, E.T. (1980b). *Underground excavations in rock*. Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Hoek, E., Brown, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 34: 1165-1186.
- Hoek, E., Carter, T.G., Diederichs, M.S. (2013). Quantification of the geological strength index chart. In: *Proceedings of the Geomechanics Symposium, 47th US Rock Mechanics*, San Francisco, CA, ARMA13-672, p. 1-8.
- 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. *Bulletin Engineering Geology Environment*, 57(2): 151-160.
-

-
- Hrašna, M., Vlčko, J. (1994). Developments in engineering geological mapping in Slovakia. In: Oliveira, R., Rodrigues, L.F., Coelho, A.G., Cunha, A.P. (eds) Proceedings of the 7th International Congress of the International Association of Engineering Geology, Lisbon, Portugal, September 1994, vol 2. A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 1231–1243.
- Hsu, S.M., Chung, M., Ku, C., Tan, C., Weng, W. (2007). An application of acoustic televiewer and double packer system to the study of the hydraulic properties of fractured rocks, 60th Canadian Geotechnical Conference & 8th joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference, pp. 415-422, V1, Ottawa, Canada.
- Hsu, S.M., Lo, H.C., Chi, S.Y., Ku, C.Y. (2011). Rock mass hydraulic conductivity estimated by two empirical models In: Dikinya O., Ed., Developments in Hydraulic Conductivity Research. InTech Pub. pp. 133-158.
- Hudson, J.A. (1989). Rock mechanics principles in engineering practice. CIRIA & Butterworths, London, 72 pp.
- Hudson, J.A. (2015). Engineering in fractured rock masses. *ISRM News Journal* 15:53-58.
- Hudson, J.A., Cosgrove, J.W. (1997). Integrated structural geology and engineering rock mechanics approach to site characterization. *Int J Rock Mech Min Sci Geom Abstr* 34(3/4):136.1–136.15.
- Hudson, J.A., Harrison, J.P. (2000). Engineering rock mechanics: an introduction to the principles. 2nd edition, Pergamon Press. 444 p.
- Hudson, J.A., Priest, S.D. (1983). Discontinuity frequency in rock masses. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abs.*, 20: 73–89.
- Hutchinson, J.N. (2001). Reading the ground: morphology and geology in site appraisal. *Quarterly Journal Engineering Geology and Hydrogeology*, 34:7–50.
- IAEG (1981a). Rock and soils description and classification for engineering geological mapping. Report by IAEG Commission on Engineering Geological Mapping. *Bulletin of the IAEG*, no. 24, pp. 235–274.
- IAEG (1981b). Recommended symbols for engineering geological mapping. Report by the IAEG Commission on Engineering Geological Mapping. *Bulletin of the IAEG*, no. 24, pp. 227-234.
- ICA – International Cartographic Association (2003). A strategic plan for the international cartographic association (2003 – 2011). International Cartographic Association, ICA.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 15(6): 319-368.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics (1981). Basic geotechnical description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 18: 85-110.
- 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.
- 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, Berlin.
- Karakus, M., Fowell, R.J. (2004). An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM). *ROCKMEC'2004-VIIth Regional Rock Mechanics Symposium*.
- Kim, B.H., Cai, M., Kaiser, P., Yang, H. (2007). Estimation of Block Sizes for Rock Masses with Nonpersistent Joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering - ROCK MECH ROCK ENG.* 40: 169-192.
- Kovári K. (1994). Erroneous concepts behind the New Austrian Tunnelling Method, *Tunnels & Tunnelling*, November 1994, Vol. 26, pp. 38-42.
- Laderian, A., Abaspoor, M. (2012). The correlation between RMR and Q systems in parts of Iran. *Tunnelling and Underground Space Technology - TUNN UNDERGR SPACE TECHNOL.* 27(1).
- Lamas, L.N. (1989). Estudo da compartimentação de maciços rochosos por uma técnica de amostragem linear e dos blocos formados pelas descontinuidades: aplicação a uma galeria do Alto Lindoso. In: *Proceedings do 3º Congresso Nacional Geotecnia, Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 3: C33-C44.
- Laubscher, D.H. (1977). Geomechanics classification of jointed rock masses: mining applications. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A, Mining industry (London)*, 86: A1-A8.
- Laubscher, D.H. (1990). A geomechanics classification system for rating of rock mass in mine design. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 90 (10): 257–273.
- Laubscher, D.H., Jakubec, J. (2000). The IRMR/MRMR rock mass classification for jointed rock masses. *SME journal (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration)*, pp. 475-481.
-

-
- Lauffer, H. (1958). Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau [Classificação de maciços rochosos para construção de túneis]. *Geologie und Bauwesen*, 24(1): 46-51. (Tradução 597, J. A. Pinto de Campos, LNEC, 1975, 12pp.).
- Mahé, S., Gasc-Barbier, M., Soliva, R. (2015). Joint set intensity estimation: comparison between investigation modes. *Bulletin Engineering Geology Environment* 74(1):171–180.
- Marence, M. (2012). Numerical simulation and excavation of caverns for PSP Limberg II . 50 Years of NATM, Experience Reports ITA-Austria.
- 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, PA, pp. 1422-1442.
- Marinos, V., Marinos, P., Hoek, E. (2005). The geological strength index: applications and limitations. *Bull. Eng. Geol. Environ*, 64: 55-65.
- Marinos, V., Proutzopoulos, G., Fortsakis, P., Koumoutsakos, D., Korkaris, K., Papouli, D. (2013). Tunnel information and analysis system: a geotechnical database for tunnels. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31(3), pp. 891–910.
- Martins R., Moreira, P., Pereira S.C., Neto E., Pereira A.M., Teixeira J., Vieira A., Chaminé H.I., 2006. A técnica de amostragem linear aplicada a estudos de compartimentação de maciços rochosos no norte de Portugal. In: *Actas do 10º Congresso Nacional de Geotecnia. Sociedade Portuguesa de Geotecnia / Univ. Nova de Lisboa*. 1:255-264.
- Mauldon, M., Dunne, W.M., Rohrbaugh, M.B. Jr. (2001). Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces. *Journal Structural Geology*, 23(2-3): 247-258.
- Medeiros, A. C.; Pereira, E., Moreira, A. (1981a). Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal, à escala 1/50000, folha 9-D (Penafiel). *Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa*.
- Medeiros, A., Pereira, E., Moreira, A. (1981b). Carta Geológica de Portugal, à escala 1/50000, folha 9-D (Penafiel). *Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa*.
- Miller, R.P. (1965). Engineering classification and index properties for intact rock. University of Illinois, 282 pp (Tese de doutoramento).
- Miranda, T., Ribeiro e Sousa, L., A.T. Gomes A.T., Tinoco J., Ferreira C. (2018). Geomechanical characterization of volcanic rocks using empirical systems and data mining techniques. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 10:138-150.
- Miranda, T., Sousa, L. R., Gomes, A. T., Tinoco, J., Ferreira, C. (2018). Geomechanical characterization of volcanic rocks using empirical systems and data mining techniques. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(1), 138–150.
- Monteiro, A. (1997). O clima urbano do Porto: contribuição para a definição das estratégias de planeamento e ordenamento do território. *Textos Universitários de Ciências Sociais e Humanas. Fundação Calouste Gulbenkian/Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica, Lisboa*. 486 pp.
- Moreno Tallon, E. (1980). Aplicación de las clasificaciones geomecánicas a los túneles de Pajares. II Curso de Sostenimientos Activos en Galerías y Tunnels, Fundacion Gomez-Pardo, Madrid.
- Müller, L. (1978). The reasons for unsuccessful applications of the New Austrian Tunnelling Method, Tunnelling Under Difficult Conditions, *Proceedings of the International Tunnel Symposium, Tokyo*, Pergamon Press, pp. 67-72.
- Müller, L. (1990). Removing the misconceptions on the New Austrian Tunnelling Method, *Tunnels & Tunnelling*, Summer 1990, 22:15-18.
- NAP – National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2020). Characterization, modeling, monitoring, and remediation of fractured rock. The National Academies Press, Washington.
- NGI – Norwegian Geotechnical Institute (2015). Using the Q-system: Rock mass classification and support design. *NGI handbook*, Oslo, 54 pp.
- OCAD – the powerful Swiss software application for Cartography and Orienteering. <https://www.ocad.com/en/> (consultado em 18 de março de 2022).
- Oliveira, R. (1987). Engineering geological investigations of rock masses for civil engineering projects and mining operations. *Memórias LNEC, Lisbon*, 693:1–28.
- Pahl, P. J. (1981). Estimating the mean length of discontinuity traces. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18(3), 221–228.
-

-
- Palmström, A. (1975). Characterization of degree of jointing and rock mass quality. Intern. Report Ing. AB. Berdel, A.S. Oslo.
- Palmström, A. (1995). RMI: a rock mass characterization system for rock engineering purposes. University of Oslo, 400 p. (Tese de doutoramento).
- Palmström, A. (1996a). Characterization of rock masses by the RMI for use in practical rock engineering. *Tunnel Underground Space Technol.*, 11(2): 175-186 (part 1); 11(3): 287-303 (part 2).
- Palmström, A. (1996b) RMI: a system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering. *J. Rock Mech. Tunn. Technol.*, 1(2): 69–108.
- Palmström, A. (2000). Recent developments in rock support estimates by the RMI. *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*, 6(1), pp. 1–19.
- Palmström, A. (2005). Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). *Tunnels and Underground Space Technology*: 362-377.
- Palmström, A. (2009). Combining the RMR, Q, and RMI classification systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(4), pp. 491–492. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.12.002>.
- Palmström, A., Singh, R. (2001). The deformation modulus of rock masses - Comparisons between in situ tests and indirect estimates. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 16. 115-131.
- Palmström, A., Stille H. (2010). *Rock engineering*. Thomas Telford Ltd., 408 pp.
- Palmström, A., Stille, H. (2014). *Rock Engineering* (2nd ed.). ICE Publishing, 2014. 444 pp.
- Peacock, D.C.P. (2006). Predicting variability in joint frequencies from boreholes. *J. Struct. Geol.*, 28(2): 353-361.
- Peel, M.C., Finlayson, B. L., McMahon, T.A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrological Earth System Sciences*, 11(5): 1633-1644.
- Pells, P.J., Bieniaszki, Z.T., Hencher, S.R., Pells, S.E. (2017). Rock quality designation (RQD): time to rest in peace. *Canadian Geotechnical Journal*, 54: 825-834.
- Pereira, E.; Ribeiro, A.; Carvalho, G. S.; Noronha, F.; Ferreira, N. & Monteiro, J. H. [coords.] (1989). *Carta Geológica de Portugal, escala 1/200 000, Folha 1. Serviços Geológicos de Portugal*.
- Pinheiro, M., Sanches, S., Miranda, T., Neves, A., Tinoco, J., Ferreira, A., Correia, A.G. (2014a). Sistema de avaliação de qualidade de taludes rochosos em fase de exploração. In: *Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 14º Congresso Nacional de Geotecnia* [<http://hdl.handle.net/1822/31142>].
- Pinheiro, R. (2013). *Classificações geomecânicas mineiras para o dimensionamento de maciços rochosos: o aplicativo MGC-RocDesign|Calc. Dissertação de mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. URI: <http://hdl.handle.net/10400.22/6417>*.
- Pinheiro, R., Ramos, L., Teixeira, J., Afonso, M.J., Chaminé, H.I. (2014b). MGC-RocDesign|CALC: a geomechanical calculator tool for rock design. In: *Alejano, L.R., Perucho, A., Olalla, C., Jiménez, R. (Eds.), Proceedings of Eurock '2014, Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses (ISRM European Regional Symposium, Vigo, Spain), CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, London, p. 655-660*.
- Pinho, T. (2010). *Geotecnia urbana da zona ribeirinha de Vila Nova de Gaia: criação de uma base de dados SIG Geotécnica. Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP. (Dissertação de Mestrado)*.
- Price, D.G. (2009). *Engineering Geology: principles and practice*. Springer. 450 pp.
- Priest, S.D. (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. Kluwer Academic Publishers, 473 p.
- Priest, S.D. (2004). Determination of discontinuity size distributions from scanline data. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 37(5): 347-368
- Priest, S.D., Hudson, J.A. (1976). Discontinuity spacing in rock. *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 13: 135-148.
- Priest, S.D., Hudson, J.A. (1981). Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 18: 183-197.
- Proske, H., Vlčko, J., Rosenbaum, M.S., Culshaw, M., Marker, B. (2005) Special purpose mapping for waste disposal sites. Report of IAEG Commission 1: *Engineering Geological Maps. Bull Eng Geol Environ* 64: pp. 1–54.
- Rabcewicz L. (1964). The New Austrian Tunnelling Method, Part one, *Water Power*, November 1964, 453-457, Part two, *Water Power*, December 1964, pp. 511-515.
-

-
- Rabcewicz L. (1965). The New Austrian Tunnelling Method, Part one, Part Three, Water Power, January 1965, pp. 19-24.
- Rabcewicz L., Golser J. (1973). Principles of dimensioning the supporting system for the “New Austrian Tunnelling Method”. Water Power, March 1973, pp. 88-93.
- Rabcewicz, L. (1948). Verfahren zum Ausbau von unterirdischen Hohlräumen, insbesondere von Tunneln. Austrian, p 165-573.
- Rabcewicz, L. (1963). Bemessung von Hohlraumbauten, die ‘Neue österreichische Bauweise’ und ihr Einfluss auf Gebirgdruckwirkungen und Dimensionierung. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, Vol. 3-4, Springer, Vienna.
- Rahn, P.H. (1986). Engineering geology: an environmental approach. Elsevier Ed.
- Ramos, L. (2008). Avaliação geotécnica e geomecânica de maciços rochosos fracturados para o controlo da qualidade do desmonte. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. (Dissertação de mestrado).
- Ramos, L. (2022). Metodologias interdisciplinares em geotecnia mineira para a qualidade do desmonte de maciços rochosos. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra (Tese de doutoramento).
- Ritter, W. (1879). Die Statik der Tunnelgewölbe. Springer, Berlin.
- Rock mass classification. <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Chapter-3-Rock-Mass-Classification.pdf> (consultado em 21 de abril de 2022).
- Rohrbaugh, M., Dunne, W., Mauldon, M. (2002). Estimating fracture trace intensity, density, and mean length using circular scan lines and windows. AAPG Bulletin. 86.
- Romana M. (1985). New adjustment rating for application of the Bieniawski classification to slopes. In: Proceedings International Symposium Rock Mechanics Mining and Civil Works. ISRM, Zacatecas, Mexico, pp. 59-63.
- Romana M. (1995). The geomechanical classification SMR for slope correction. In: Proceedings 8th International Congress Rock Mechanics, ISRM, Tokyo. 3:1085-1092.
- Romana M. (2004). DMR (an adaptation of RMR), a new geomechanics classification for use in dams foundations. In: Proceedings do 9º Congresso Nacional de Geotecnia, Aveiro. 12 p.
- 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., Tomás, R., Serón, J.B. (2015). Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification: thirty years review. In Hadjigeorgiou, J., Archibald, J. (eds.), Proceedings of the 13th International Symposium on Rock Mechanics, ISRM, Quebec, p. 1-9.
- Romana, M., Tomás, R., Serón, J.B. (2015). Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification: thirty years review. ISRM Congress 2015 Proceedings - International Symposium on Rock Mechanics, Quebec, Canada. 10 pp.
- Rutledge, J. C., Preston, R.L. (1978). Experience with engineering classification of rock for the prediction of tunnel support. Proceedings of an International Tunnelling Symposium, Tokyo, Japan, A-3-1.:7.
- Santos, T. (2013). Implementação de uma base de dados geográficos para a gestão das matérias-primas do grupo Cimpor. Dissertação de mestrado. Universidade de Lisboa, Lisboa. URI: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/10526>.
- Schmidt, E. (1951). A non-destructive concrete tester. Concrete, 59 (8): 34-35.
- Serafim, J.L., Pereira, J.P. (1983). Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski. In: Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and Underground Constructions, p. 1133-1144.
- Shah, S., Hoek, E. (2011). Simplex reflection analysis of laboratory strength data. Canadian Geotechnical Journal, 29. 278-287. 10.1139/t92-031.
- Singh, B., Goel, R. K. (1999). Rock Mass Classification - A Practical Approach in Civil Engineering. p. 62–91.
- Singh, B., Goel, R.K. (2011). Engineering rock mass classification: tunnelling, foundations and landslides. Butterworth-Heinemann, Elsevier Inc.
- Skinner, E.H. (1988). A ground support prediction concept: the Rock Structure Rating (RSR) model. In Kirkaldie, L., ed., Rock Classification Systems for Engineering Purposes. ASTM International, pp. 43-64.
- Smith, J.V. (2004). Determining the size and shape of blocks from linear sampling for geotechnical rock mass classification and assessment. Journal Structural Geology, 26(6-7): 1317-1339.
-

- Smith, M.R., Collis, L., Fookes, P.G., Lay, J., Sims, I., West, G. (2001). *Aggregates: Sand, Gravel and Crushed Rock Aggregates for Construction Purposes*. 3rd ed.. Engineering Geology Special Publications, Vol. 17. The Geological Society of London: London.
- Sousa, L. (2007). Granite fracture index to check suitability of granite outcrops for quarrying. *Engineering Geology* 92:146–159.
- Terzaghi, K. (1946). Rock defects and locals on tunnel supports. In: Proctor R.V. & White T.L., eds, *Rock tunnelling with steel supports*, The Commercial Shearing & Stamping Co. Youngstown, Ohio, 1: 17-99.
- Terzaghi, R.D. (1965). Sources of errors in joint surveys. *Géotechnique* 15:287–304.
- Three views of GIS (2009a). https://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Three_views_of_GIS (Consultado em 18 de março de 2022).
- Tomlin, C.D. (1990). *Geographic Information Systems and Cartographic Modelling*. Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, New Jersey.
- Tomlin, C.D. (1991). Cartographic modelling. In: Maguire, D.J., Goodchild, M.F., Rhind, D.W. (eds.) *Geographical Information Systems: principles and applications*. Longman, London, 1:361-74.
- Tomlinson, R. F. (1962). Computer mapping: an introduction to the use of electronic computers in the storage, compilation and assessment of natural and economic data for the evaluation of marginal lands. National Land Capability Inventory Seminar. Agricultural Rehabilitation and Development Administration of the Canada Department of Agriculture.
- Toyos, J.M., Taboada, J., Limbartero, M., Romero, J.A., Menendez, A. (1994). Estudio de las discontinuidades en yacimientos de roca ornamental. *Boletim Geologico y Minero, Madrid*, 105(1):110-118.
- Trimble. (2007). *GeoExplorer® 2005 series*. https://arf.berkeley.edu/files/webfiles/all/arf/equipment/field/gps/trimble/geoXH/GeoExpl2005_Getting_started.pdf (consultado em 22 de março de 2022).
- UNESCO-IAEG (1976). *Engineering geological maps: A guide to their preparation*. The Unesco Press.
- Velhas, E. (1991). A bacia hidrográfica do Rio Leça: estudo hidroclimatológico. *Geografia, Rev. Fac. Letras, Porto*, 7 (1ª série): 139-251.
- Waltham, T. (2002). *Foundations of engineering geology*. 2nd ed. London, Spon Press.
- Watkins, H., Bond, C.E., Healy, D., Butler, R.W.H. (2015). Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterise heterogeneous fracture networks at outcrop. *Journal of Structural Geology* 72:67–82.
- Whitten, D.G.A., Brooks, J.R.V. (1972). *The Penguin dictionary of geology*. Penguin, UK.
- Wickham G.E., Tiedemann H.R., Skinner E.H. (1972). Support determination based on geologic predictions. In: Lane K.S. Garfield, (eds), *Proceedings of the 1st North American Rapid Excavation Tunnelling Conference (RETC)*, Chicago. American Institute of Mining, L.A. Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), New York, p. 43-64.
- Wickham, G.E., Tiedemann, H.R., Skinner, E.H. (1974). Ground support prediction model: RSR concept in: *Proceedings of the 2nd North American Rapid Excavation & Tunneling Conference (RETC)*, San Francisco. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), New York, pp. 691-707.
- Wu, H., Pollard, D. D. (1995). An experimental study of the relationship between joint spacing and layer thickness. *Journal of Structural Geology*, 17(6):887–905.
- Zeeb, C., Gomez-Rivas, E., Bons, P.D., Blum, O. (2013). Evaluation of sampling methods for fracture network characterization using outcrops. *AAPG Bulletin*, 97(9):1545–1566.
- Zeiler, M., 2010. *Modelling our world: The ESRI guide to geodatabase concepts*, 2nd edition, ESRI Press, Redlands
- Zeiler, M., Murphy, J. (2010). *Modeling our world: The ESRI guide to geodatabase design*. Environmental Systems Research Institute (Redlands, California). 2nd ed., ESRI Press
- Zhang, L. (2004). *Drilled shafts in rock analysis and design*. A. A. Balkema Pub., Taylor & Francis Group Plc.
- Zuquette L., Gandolfi N. (2004). *Cartografia geotécnica*. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil.

(página propositadamente em branco)

Anexos

(página propositadamente em branco)

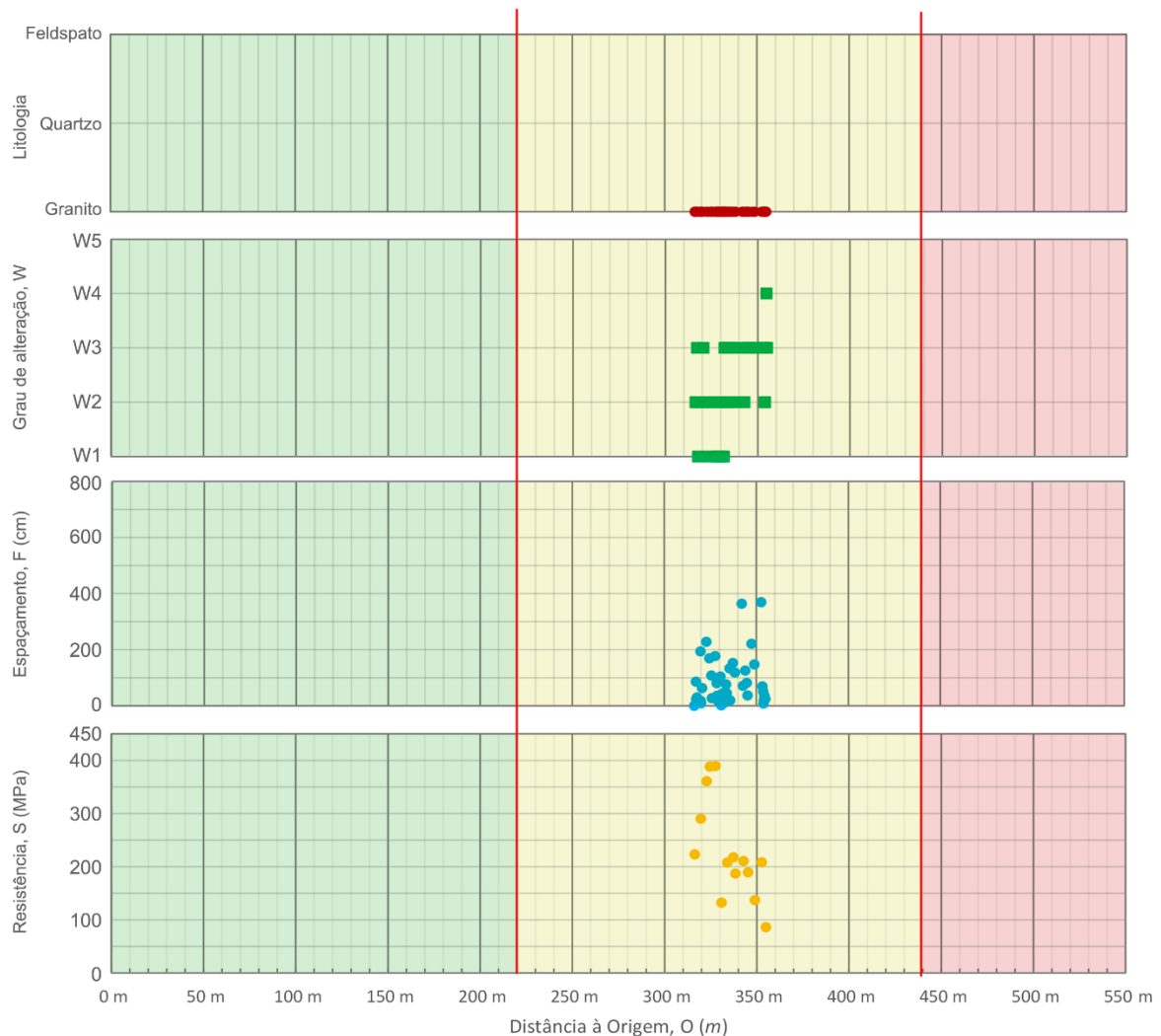
Índice de Anexos

Anexo I - Definição do zonamento geotécnico por pisos da Pedreira do Poço Negro.....	159
Anexo II - Aplicação do ábaco <i>GSI/2013</i> (Hoek & Brown, 1997; Hoek et al., 1998; Marinos & Hoek, 2000; Marinos et al., 2005, Hoek et al., 2013; Santa et al., 2019) para as diferentes zonas geotécnicas.	164
Anexo III - Breve guia de utilização <i>SCANGEO-DATA/BGD v3.0</i>	165
Anexo IV - Resumo da dissertação em formato 'Poster'.	166

(página propositadamente em branco)

Anexo I - Definição do zonamento geotécnico por pisos da Pedreira do Poço Negro.

Piso -2



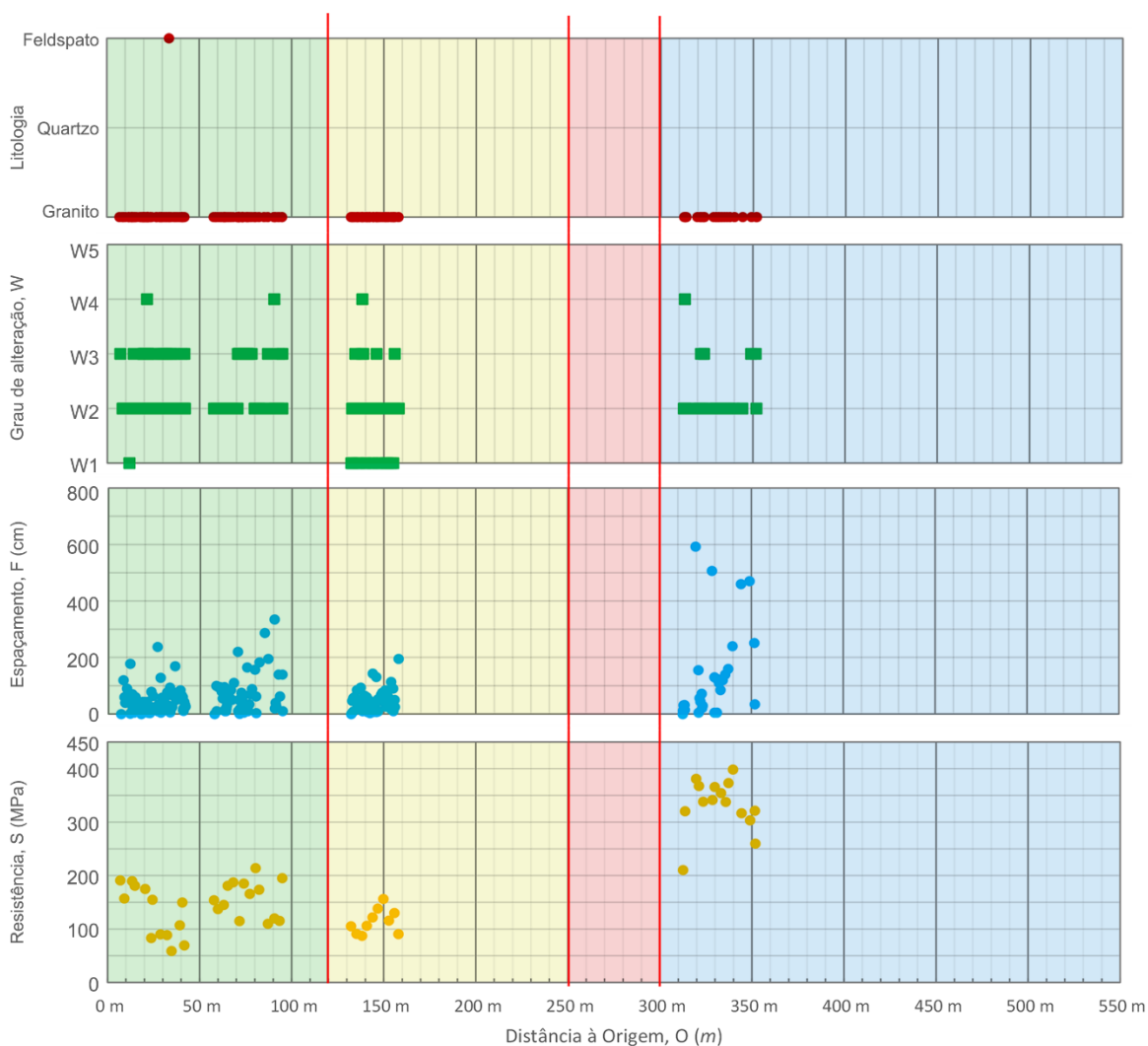
ZG1.A - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W_2 a W_3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a próximas, com média no intervalo 10 a 60 cm (F_3 a F_4), com mediana de 30 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 120 a 190 MPa (S_2), com mediana de 154 MPa (S_2).

ZG1.B - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W_2); ii) espaçamento das descontinuidades próximas a medianamente afastadas, com média no intervalo 20 a 80 cm (F_3 a F_2), com mediana de 40 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 100 a 150 MPa (S_2), com mediana de 121 MPa (S_2).

ZG2.A - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W_2); ii) espaçamento das descontinuidades muito a medianamente afastadas, com média no intervalo 30 a 195 cm (F_3 a F_2), com mediana de 80 cm (F_2); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valores superiores a 250 MPa (S_1).

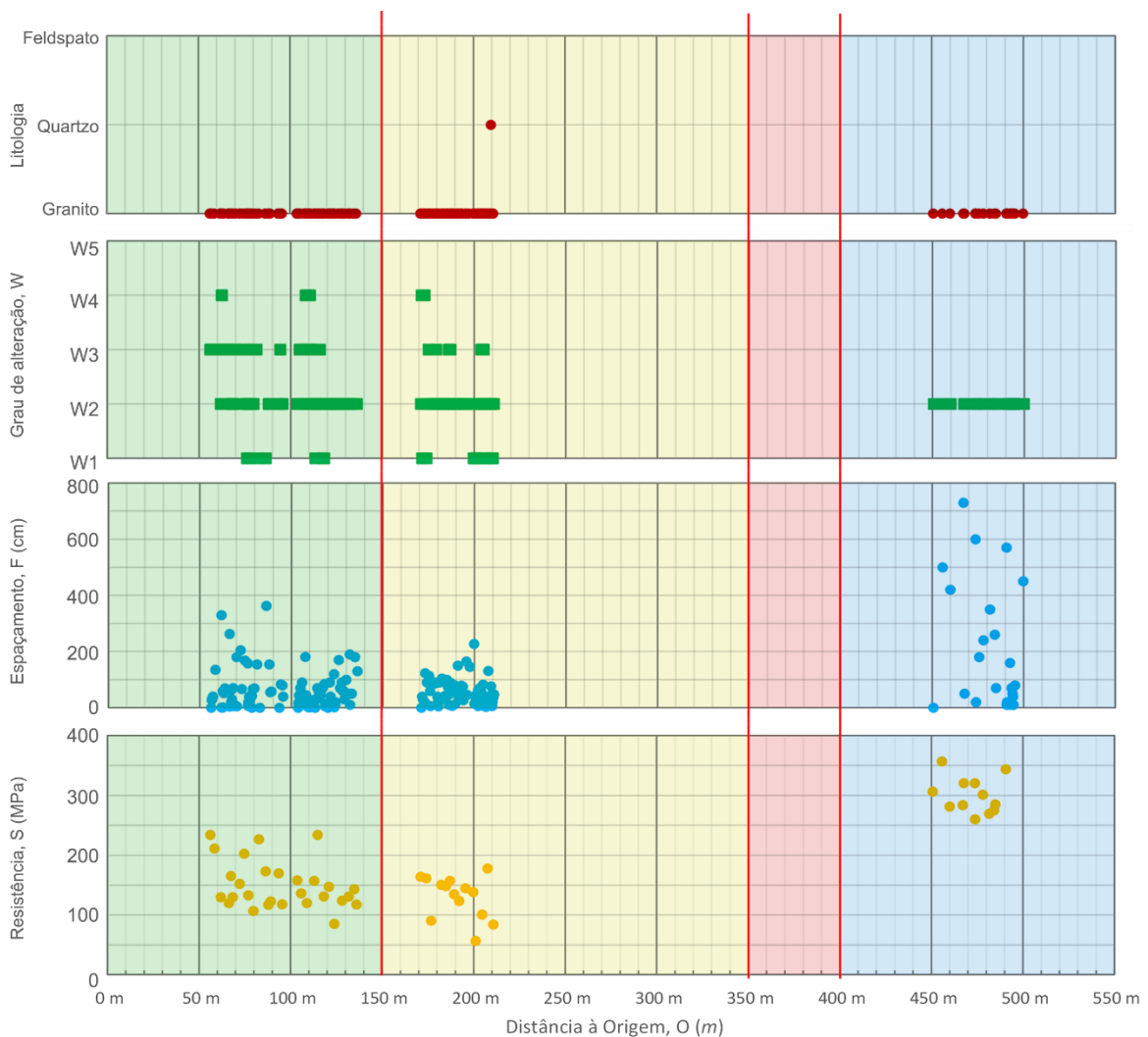
ZG2.B - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W_2 a W_3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a afastadas, com média no intervalo 20 a 100 cm (F_3 a F_2), com mediana de 39 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valor da mediana superior a 210 MPa (S_1).

Piso -1



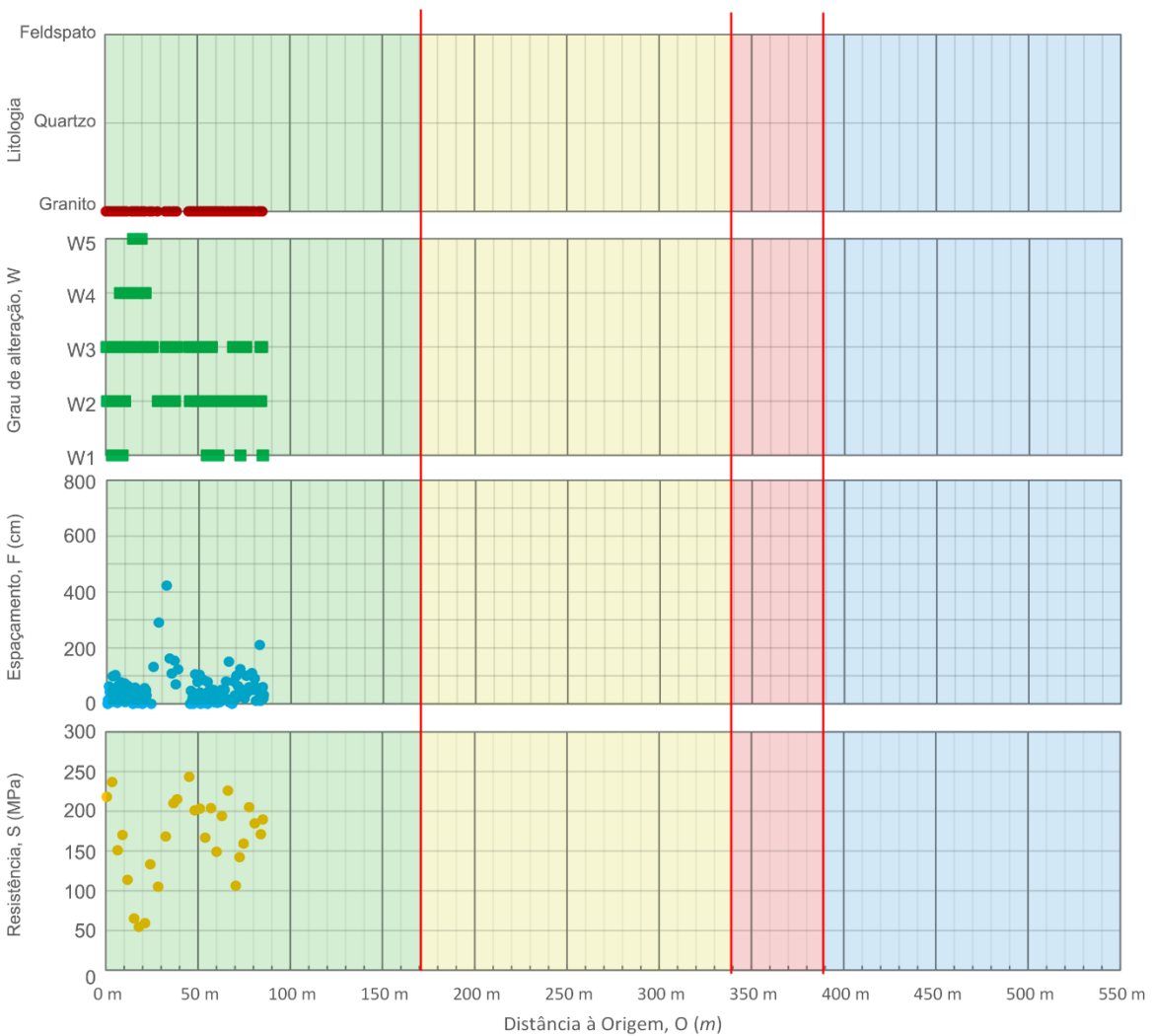
- ZG1.A** - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W_2 a W_3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a próximas, com média no intervalo 10 a 60 cm (F_3 a F_4), com mediana de 30 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 120 a 190 MPa (S_2), com mediana de 154 MPa (S_2).
- ZG1.B** - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W_2); ii) espaçamento das descontinuidades próximas a medianamente afastadas, com média no intervalo 20 a 80 cm (F_3 a F_2), com mediana de 40 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 100 a 150 MPa (S_2), com mediana de 121 MPa (S_2).
- ZG2.A** - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W_2); ii) espaçamento das descontinuidades muito a medianamente afastadas, com média no intervalo 30 a 195 cm (F_3 a F_2), com mediana de 80 cm (F_2); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valores superiores a 250 MPa (S_1).
- ZG2.B** - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W_2 a W_3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a afastadas, com média no intervalo 20 a 100 cm (F_3 a F_2), com mediana de 39 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valor da mediana superior a 210 MPa (S_1).

Piso 0



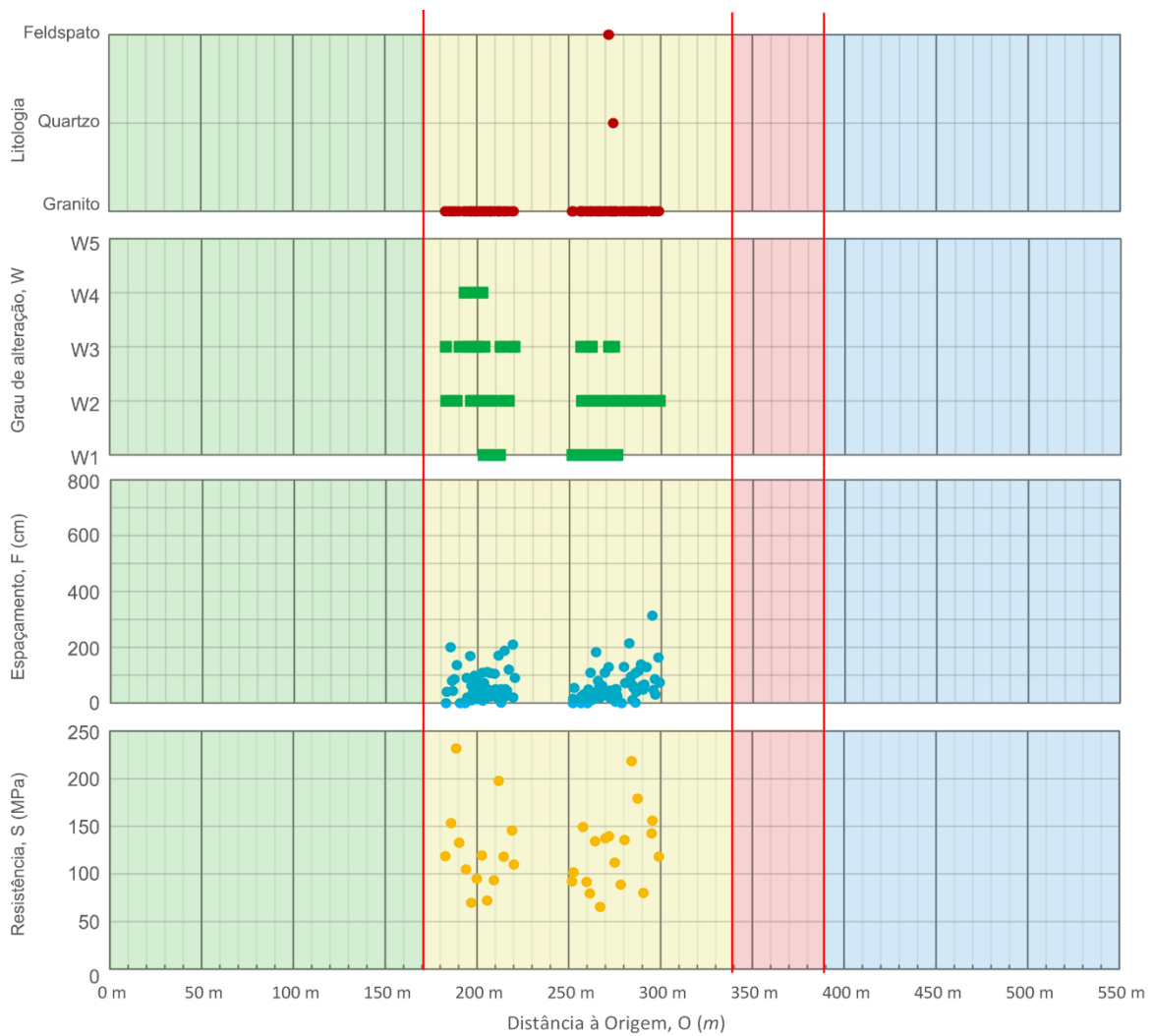
- ZG1.A** - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W_2 a W_3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a próximas, com média no intervalo 10 a 60 cm (F_3 a F_4), com mediana de 30 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 120 a 190 MPa (S_2), com mediana de 154 MPa (S_2).
- ZG1.B** - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W_2); ii) espaçamento das descontinuidades próximas a medianamente afastadas, com média no intervalo 20 a 80 cm (F_3 a F_2), com mediana de 40 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 100 a 150 MPa (S_2), com mediana de 121 MPa (S_2).
- ZG2.A** - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W_2); ii) espaçamento das descontinuidades muito a medianamente afastadas, com média no intervalo 30 a 195 cm (F_3 a F_2), com mediana de 80 cm (F_2); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valores superiores a 250 MPa (S_1).
- ZG2.B** - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W_2 a W_3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a afastadas, com média no intervalo 20 a 100 cm (F_3 a F_2), com mediana de 39 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valor da mediana superior a 210 MPa (S_1).

Piso 1



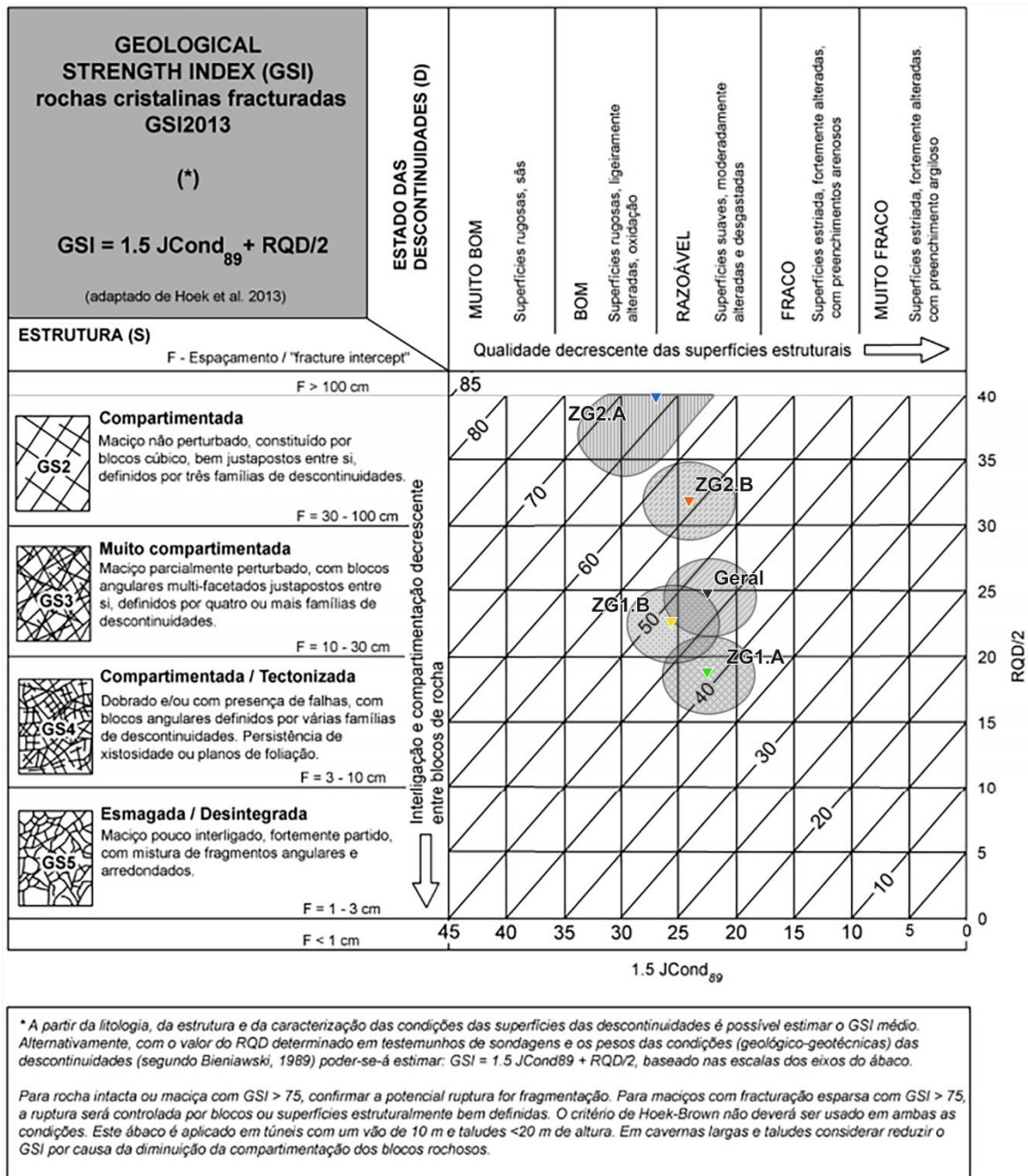
- ZG1.A** - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W_2 a W_3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a próximas, com média no intervalo 10 a 60 cm (F_3 a F_4), com mediana de 30 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 120 a 190 MPa (S_2), com mediana de 154 MPa (S_2).
- ZG1.B** - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W_2); ii) espaçamento das descontinuidades próximas a medianamente afastadas, com média no intervalo 20 a 80 cm (F_3 a F_2), com mediana de 40 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 100 a 150 MPa (S_2), com mediana de 121 MPa (S_2).
- ZG2.A** - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W_2); ii) espaçamento das descontinuidades muito a medianamente afastadas, com média no intervalo 30 a 195 cm (F_3 a F_2), com mediana de 80 cm (F_2); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valores superiores a 250 MPa (S_1).
- ZG2.B** - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W_2 a W_3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a afastadas, com média no intervalo 20 a 100 cm (F_3 a F_2), com mediana de 39 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valor da mediana superior a 210 MPa (S_1).

Piso 2



- ZG1.A** - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W_2 a W_3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a próximas, com média no intervalo 10 a 60 cm (F_3 a F_4), com mediana de 30 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 120 a 190 MPa (S_2), com mediana de 154 MPa (S_2).
- ZG1.B** - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos, por vezes com estruturas filonianas quartzo-feldspáticas. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W_2); ii) espaçamento das descontinuidades próximas a medianamente afastadas, com média no intervalo 20 a 80 cm (F_3 a F_2), com mediana de 40 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial elevada, com uma média no intervalo 100 a 150 MPa (S_2), com mediana de 121 MPa (S_2).
- ZG2.A** - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente alterado (W_2); ii) espaçamento das descontinuidades muito a medianamente afastadas, com média no intervalo 30 a 195 cm (F_3 a F_2), com mediana de 80 cm (F_2); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valores superiores a 250 MPa (S_1).
- ZG2.B** - Granito de duas micas, grão médio a fino, com tendência porfiróide e xenólitos. O maciço encontra-se: i) ligeiramente a moderadamente alterado (W_2 a W_3); ii) espaçamento das descontinuidades medianamente afastadas a afastadas, com média no intervalo 20 a 100 cm (F_3 a F_2), com mediana de 39 cm (F_3); iii) resistência à compressão uniaxial muito elevada, com valor da mediana superior a 210 MPa (S_1).

Anexo II - Aplicação do ábaco GSI/2013 (Hoek & Brown, 1997; Hoek et al., 1998; Marinos & Hoek, 2000; Marinos et al., 2005, Hoek et al., 2013; Santa et al., 2019) para as diferentes zonas geotécnicas.





1 Âmbito

O aplicativo geoinformático **SCANGEO-DATA|BGD v.3.0** consiste numa ferramenta robusta que permite analisar e organizar os dados estatísticos relativos aos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos propostos pela ISRM (1978, 1981). A ordem de inserção de dados deve respeitar o sentido crescente dos painéis em estudo (por exemplo, patamar de uma exploração). As linhas de amostragem ('scanlines') deverão ter um ponto de origem comum, e deverão manter-se na mesma direção em todo o local de estudo. A distância à origem (O) contará a partir desse ponto. No caso de mudança de 'scanline', ou aquando da interrupção da mesma, dever-se-á colocar **X** na coluna B, na descontinuidade em que recomeça. É recomendado utilizar o menor ângulo (< 180°) na direção das descontinuidades, e em direção a Este (E). A **SCANGEO-DATA|BGD** foi originalmente criada e desenvolvida em Ms. Excel por Ramos (2008) e Fonseca (2008) [pormenores em Chaminé et al. (2016)]; posteriormente melhorada, corrigida e atualizada na v.2.0 por Ramos (2022) e na v.3.0 por Lopes (2022), sob supervisão de L. Ramos e H.I. Chaminé.

2 Inputs, outputs e listagem de opções

A linha 12 da base de dados apresenta três símbolos distintos.  representa 'inputs', dados que devem ser inseridos pelo utilizador. Os 'inputs' principais são o painel em estudo, a distância à origem (O), a altura da 'scanline', a atitude das descontinuidades, a abertura (a), o comprimento exposto (L), entre outros.

Colunas identificadas com  permitem ao utilizador escolher uma das opções pré-inseridas, relacionadas com os parâmetros geológico-geotécnicos (ISRM, 1978, 1981).

Finalmente, o símbolo  representa células associadas a funções automáticas, nomeadamente designações e cálculos automáticos do espaçamento ou extensão da descontinuidade.

A resistência à compressão uniaxial pode ser inserida manualmente na **SCANGEO-DATA|BGD v.3.0**, tendo em consideração a descontinuidade associada na utilização do aplicativo **SCHMIDT-DATA|UCS v.3.0**. As litologias presentes no local do estudo devem ser alteradas na folha 'Litologia'.

3 Zonamento geotécnico

As zonas geotécnicas estão organizadas de **ZG1** a **ZG5**. A sua descrição e nomenclatura desejada podem ser modificadas na folha 'Zonas Geotécnicas'. Na folha 'Zonamento' são gerados gráficos referentes à heterogeneidade litológica, grau de alteração (W), espaçamento e grau de fraturação (F), resistência e grau de resistência (S). Poderão ser analisados outros parâmetros geotécnicos propostos pela ISRM (1981). Com linhas de apoio pretende-se dividir, por painel / patamar, diferentes zonas com variações expressivas nestes parâmetros geológicos, geotécnicos e geomecânicos. Após a sua definição, dever-se-á inserir, manualmente, na base de dados a zona geotécnica correspondente a cada descontinuidade a partir da distância à origem presente no eixo das abcissas.

4 Famílias de descontinuidades

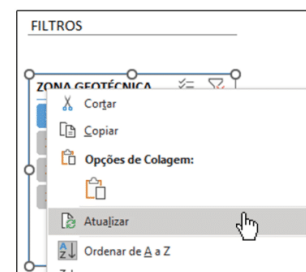
A folha 'FP_Geral' permite definir até quatro famílias de descontinuidades e até duas famílias de descontinuidades sub-horizontais (com inclinação < 35°). O primeiro gráfico apresenta o número de descontinuidades inseridas em cada intervalo com a amplitude definida nas células **C12** a **C15**. Pretende-se definir as famílias com vista a reduzir o número de descontinuidades aleatórias, permitindo, em cada família, ajustar o intervalo através de barras horizontais. Selecionando a família pretendida na célula **V4** e um dos quadrantes de inclinação correspondentes na célula **W4**, o programa permite contar o intervalo dominante de inclinação.

O intervalo pode novamente ser ajustado na barra horizontal. As folhas 'FP_ZG1' a 'FP_ZG5' permitem repetir o processo para as restantes zonas geotécnicas.

Na ausência de uma ou mais famílias, é recomendado eliminar o valor de amplitude e direção nas colunas **F** e **C** para a direção e eliminar o quadrante nas células na coluna **T** para a inclinação.

5 Report / Relatório

A folha 'Report' apresenta um resumo estatístico, análise gráfica e descritiva dos dados inseridos, por zona geotécnica, painel/patamar ou família de descontinuidades. É recomendado, sempre que forem efetuadas alterações, atualizar os dados carregando no botão direito do rato sobre o quadro dos filtros de zona geotécnica, painel/patamar ou principais famílias de descontinuidades.



6 Sugestões Bibliográficas

ISRM – International Society for Rock Mechanics (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 15(6): 319-368.

ISRM – International Society for Rock Mechanics (1981). Basic geotechnical description of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 18: 85-110.

Chaminé, H.I.,..., Fonseca, L., Ramos, L. (2016). Aplicativos informáticos para análise e avaliação de dados de campo em geociências de engenharia, geotecnia e hidrogeomecânica de maciços rochosos fracturados: MGC-RocDesign|Calc e GeoTech|CalcTools. In: H.I. Chaminé, M.J. Afonso, A.C. Galiza (eds.), Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor – Uma Homenagem. Coleção LABCARGA-Geo2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 345 – 377.

Anexo IV - Resumo da dissertação em formato 'Poster'.

Geotechnics and geomechanics of the Poço Negro quarry's rock mass (Penafiel): contributions to a geotechnical mapping of the georesource

Geotechnical and Geoenvironmental MSc, ISEP
October 2022



Daniel Lopes
Advisor: Professor Helder I. Chaminé

1 INTRODUCTION AND GOALS

This project focuses on the geological, geotechnical and geomechanical characterization of the Poço Negro quarry's rock mass¹, located in Penafiel (Porto), as shown in figure 1. The first step was applying the scanline sampling technique, which helps provide vital information about the discontinuities, highlighting the lithological heterogeneity, the weathering degree (W), the fracture spacing grade (F), the weathering degree (WV) and the uniaxial compression strength grade (S). The parameters mentioned above are essential to geotechnical zoning, which consists of designated areas with geotechnical similarities. Furthermore, the previously mentioned methodology can be complemented by the geomechanical zoning based on the results of different geotechnical indexes and geomechanical classifications (figure 2).

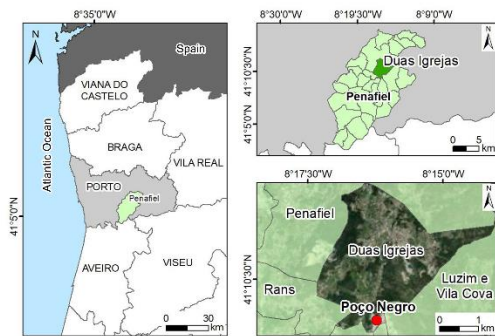


Figure 1: Geographical framework of Poço Negro's quarry

2 GEOTECHNICAL ZONING

The information gathered from the different scanlines surveys resulted in four distinctive geotechnical sub-zones, all geologically represented by medium to fine-grained porphyritic monzonite granites. Figure 3 illustrates a 3D model of the quarry with the implemented geotechnical zoning.



*Approximate scale

Geotechnical Zoning (preliminary version September 2022)

Industrial use: aggregates

ZG1.A: Slightly to moderately weathered rock mass (W₂ to W₃), with average spacing between 10 and 60 cm (F₃ to F₄). Average uniaxial compressive strength between 120 and 190 MPa (S₂).

ZG1.B: Slightly weathered rock mass (W₂), with average spacing between 20 and 80 cm (F₃ to F₂). Average uniaxial compressive strength between 100 and 150 MPa (S₁).

Industrial use: ornamental

ZG2.A: Slightly weathered rock mass (W₂), with average spacing between 30 and 195 cm (F₃ to F₂). Average uniaxial compressive strength over 250 MPa (S₁).

ZG2.B: Slightly to moderately weathered rock mass (W₂ to W₃), with average spacing between 20 and 100 cm (F₃ to F₂). Average uniaxial compressive strength over 210 MPa (S₁).

--- Photo-interpreted lineaments Water reserve

Figure 3: Geotechnical zoning mapping proposal for the Poço Negro quarry (September 2022).

3 GEOMECHANICAL ZONING

The geotechnical indexes studied were the Rock Quality Designation (RQD), the Geological Strength Index (GSI) and the Rock Mass Index (RMI), followed by the geomechanical classifications such as Rock Mass Rating (RMR), Q-system and Surface Rock Classification (SRC). These indexes, resulting in the geomechanical zoning represented in the 3D model in figure 4, were useful to understand if the rock mass had the suitability to be extracted as an ornamental stone, subsequently using the Granite Fracturing Index (GFI), applied to each geotechnical zone, concluding if the rock mass had the desired characteristics.

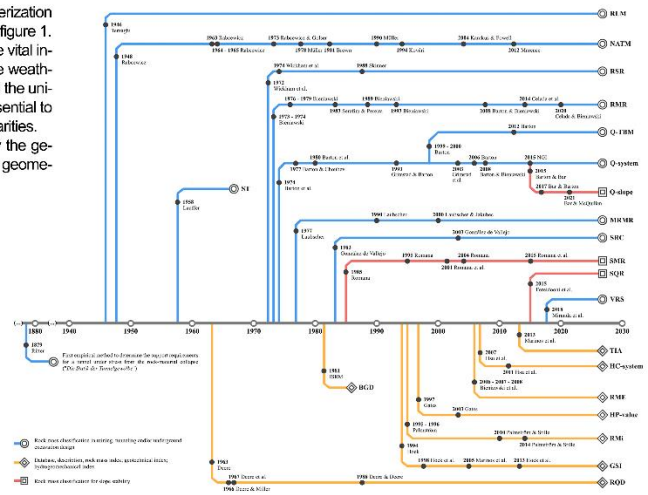


Figure 2: A summary of rock-mass classifications and geotechnical indexes for rock engineering purposes.



*Approximate scale

Geomechanical Zoning (preliminary version September 2022)

Industrial use: aggregates

ZGM1: Granitic rock mass of poor to reasonable geomechanical quality ($TRQD_{1.0} = 35 - 50\%$; $GSI_{2013} = 40 - 50$; $RMI_{2000} = 3.5 - 3.75$; $RMR_{IS} = 55 - 70$; $Q\text{-system} = 1.4 - 1.6$; $SRC = 35 - 45$)

Industrial use: ornamental

ZGM2: Granitic rock mass of good to reasonable geomechanical quality ($TRQD_{1.0} = 60 - 70\%$; $GSI_{2013} = 55$; $RMI_{2000} = 13.3$; $RMR_{IS} = 61 - 71$; $Q\text{-system} = 16$; $SRC = 53 - 63$)

ZGM3: Granitic rock mass of good geomechanical quality ($TRQD_{1.0} = 85 - 95\%$; $GSI_{2013} = 67$; $RMI_{2000} = 50.2$; $RMR_{IS} = 69 - 79$; $Q\text{-system} = 30$; $SRC = 58 - 68$)

--- Photo-interpreted lineaments Water reserve

Figure 4: Geomechanical zoning mapping proposal for the Poço Negro quarry (September 2022).

4 CONCLUDING REMARKS

The geological-geotechnical and geomechanical evaluation of Poço Negro quarry's rock mass resulted in mapping 4 geotechnical zoning and 3 geomechanical zoning. ZG1.A and ZG1.B, equivalent to ZGM1, represent a moderately fractured (F₃) and slightly weathered rock mass (W₂) currently being exploited as aggregates. On the other hand, ZG2.A and ZG2.B, equivalent to ZGM3 and ZGM2, respectively, are regarded as generally better quality rock mass in fracturing and strength degrees, presently being exploited as an ornamental stone. However, only ZG2.A, or ZGM3, has suitable characteristics for ornamental rock exploitation, as proven by the Granite Fracturing Index (GFI), resulting in 0.47.

5 ACKNOWLEDGEMENTS

This project was accomplished in collaboration with BRITAFIEL - Agregados e Ornamentais, S.A. and LABCARGA|ISEP - Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada.

I want to especially thank my scientific advisor, Professor Helder I. Chaminé (LABCARGA|ISEP) and my company supervisor, Eng. Rui Santos Silva (BRITAFIEL, S.A.), for all the help and support throughout the development of this project.

¹Poço Negro's quarry extracts both aggregates and ornamental stone