



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Classificações geomecânicas mineiras para o dimensionamento
de maciços rochosos: o aplicativo MGC-RocDesign | Calc**

Rogério Fernando Silva Pinheiro

160 ANOS 1827-2017 **isep** Instituto Superior de Engenharia do Porto

 **LABCARGA**
LABORATÓRIO DE CARTOGRAFIA
E GEOLÓGIA APLICADA

**POLITÉCNICO
DO PORTO**

2013



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Classificações geomecânicas mineiras para o dimensionamento de maciços rochosos: o aplicativo MGC-RocDesign | Calc

Rogério Fernando Silva Pinheiro

Nº 1071199

*Dissertação apresentada 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.*

Júri

Presidente

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

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

Doutor José Augusto de Abreu Fernandes
Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutora Maria da Conceição Carvalho Benta de Oliveira Neves
Professora Adjunta, Departamento de Engenharia Informática, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre Luís Carlos Correia Ramos
Assistente Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto
Diretor de Produção da MonteAdriano Agregados SA – Grupo Elevo, Póvoa de Varzim

*A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi defendida em prova pública, pelo Licenciado Rogério Fernando Silva Pinheiro, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP), em 30 de Julho de 2013, mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **19 (dezanove) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta.*

O Diretor do MEGG|ISEP

Dedico esta tese a meus Pais...

Agradecimentos

A elaboração desta dissertação contou com importantes apoios e incentivos, ao longo de intensos dezoito meses, sem os quais não se teriam tornado uma realidade e em que estarei respeitosamente grato.

De seguida, passo a destacar algumas das personalidades incontornáveis às quais são dirigidas algumas palavras e os meus sinceros agradecimentos:

- Ao meu orientador científico Professor Helder I. Chaminé (DEG|ISEP), pelos ensinamentos, apoio, paciência, conselhos e sugestões críticas, palavras de ânimo e exigente acompanhamento criativo numa das etapas cruciais da minha vida académica. Além disso, pela imensa partilha bibliográfica especializada, bem como pela sua amizade e franqueza aquando da discussão dos múltiplos aspetos da investigação. Grato também por me ter recebido, durante este intenso período, no seio da excelente equipa do LABORATÓRIO DE CARTOGRAFIA E GEOLOGIA APLICADA do ISEP. Ao Professor Helder I. Chaminé, reitero um muitíssimo obrigado pelo convite, o qual abracei de imediato com imenso orgulho e responsabilidade, já que depositou em mim uma enorme confiança ao “desafiar-me a sujar as mãos”, por volta de Janeiro de 2012, para a realização desta investigação; espero ter estado à altura durante este longo período para dar o tão desejado passo seguinte, ou seja, tornar-me um geoprofissional em pleno. Obrigado Professor, por tudo e, sobretudo, por “fazer-me acreditar nas minhas capacidades!”...;
- O Professor José Augusto Fernandes (DEG|ISEP) permitiu, como meu responsável do LABORATÓRIO DE GEOTECNIA E MATERIAIS E CONSTRUÇÃO do ISEP, que este sonho fosse tornado realidade. Estou-lhe grato por todas as oportunidades em termos de experiência profissional que me proporcionou ao longo destes últimos cinco anos, as quais agarrei com “unhas e dentes” e, sobretudo, pela amizade que se foi construindo ao longo dos tempos, bem assim pelos seus ensinamentos com um “timbre paternal”, pelas suas discretas críticas e a nunca esquecida frase “faça-se por ser melhor”, fizeram-me sentir, paulatinamente, as coisas com um outro olhar... Obrigado Professor, por “estar sempre aí...”;
- Ao Mosteiro de S. Martinho de Tibães (Direcção Regional de Cultura do Norte), na pessoa da Arquitecta Maria João Dias Costa, pelo incedível apoio e acesso concedido para a realização do trabalho subterrâneo na Mina das Azeleiras/Tibães;

- À Professora Maria Conceição Neves (DEI|ISEP) pelo apoio inequívoco na fase inicial da conceptualização da dissertação, pela troca de ideias, conselhos e sugestões relativas ao ambiente de programação e suas interações com a geomecânica mineira;
- À Professora Maria José Afonso (DEG|ISEP) pelo seu discreto apoio e incentivo durante a realização deste estudo, bem como todas as achegas relativas ao tópico da hidrogeotecnia;
- À Mestre Liliana Freitas e ao Doutor José Teixeira (Labcarga|ISEP) pelo companheirismo, amizade, boa disposição, contributo e apoio na cartografia SIG durante esta árdua caminhada;
- Aos Mestres Luís Ramos e Luís Fonseca (MonteAdriano: Agregados SA) pela partilha das bases de dados dinâmicas geológico-geotécnicas das suas investigações de mestrado e pela troca de impressões, bem como ao Professor A. Carlos Galiza (DEG|ISEP), pela partilha de algumas reflexões das suas investigações de doutoramento em geotecnia mineira;
- À Dra. Ana Costa (ISEP), pela amizade, pelo apoio quando mais precisava e pelas suas palavras de incentivo para sempre prosseguir...;
- Aos amigos e colegas Mestres Ricardo Pereira e Marlene Madureira, pela partilha dos dados e informações incluídas nas suas teses de mestrado;
- Aos colegas e amigos de Curso (vocês sabem quem são, por isso, não vos nomearei, pois corria o risco de me esquecer de alguém...) que sempre me viram com capacidade lutadora para chegar mais longe;
- Um agradecimento especial aos diretores dos Centros de Prestação de Serviços do ISEP por todas as facilidades na utilização dos equipamentos: Professor Helder I. Chaminé do LABORATÓRIO DE CARTOGRAFIA E GEOLOGIA APLICADA (LABCARGA|ISEP), enquadrando-se esta investigação no projecto HIDROURBAN (“Hydrogeology, geomechanics and geoconservation of ancient watermines”; LABCARGA-IPP-ISEP|PADInv’2007/08); Professor José Augusto Fernandes do LABORATÓRIO DE GEOTECNIA E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO (LGMC|ISEP);
- A todos os meus Amigos, especialmente aos “Torninhos”, por todo apoio, críticas e “juntos seremos mais fortes” (T4EVER);
- *Last but not least*, à minha família, realçando os meus Pais pelo carinho, amor e sacrifício que fizeram por mim ao longo destes anos, e ainda pelos seus ensinamentos e valores transmitidos, a quem devo tudo aquilo que me tornei hoje...; um bem-haja. *Muitíssimo obrigado!*

Palavras-chave

Geomecânica mineira, classificações de maciços rochosos, programa MGC-RocDesign|CALC, mina das Aveleiras/Tibães.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo destacar a importância da utilização de *software* de geoengenharia no estudo das classificações de maciços rochosos nas engenharias de minas e geotécnica. Esta investigação pretendeu demonstrar a importância das classificações geomecânicas e índices geológico-geomecânicos, tais como a *Rock Mass Rating (RMR)*, *Rock Tunnelling Quality Index (Q-system)*, *Surface Rock Classification (SRC)*, *Rock Quality Designation (RQD)*, *Geological Strength Index (GSI)* and *Hydro-Potential Value (HP)*. Para esse efeito foi criada e desenvolvida uma calculadora geomecânica – **MGC-RocDesign|CALC: ‘Mining Geomechanics Classification systems for rock engineering design (version beta)’** – para de certa forma tornar mais simples, rápido e preciso o estudo das classificações geomecânicas sem que seja necessário recorrer manualmente às fastidiosas tabelas das classificações. A **MGC-RocDesign|CALC** foi criada e desenvolvida no programa de folha de cálculo Microsoft Excel™ em linguagem *Visual Basic for Applications*® proporcionando o ambiente de carregamento de dados mais apelativos para o utilizador. Foi ainda integrada neste aplicativo a Calculadora *Geotech/CalcTools* que resulta da fusão das bases de dados *ScanGeoData|BGD* e *SchmidtData|UCS* criadas por Fonseca et al. (2010). Toda a informação foi integrada numa base de dados dinâmica associada a uma plataforma cartográfica em Sistemas de Informação Geográfica. Apresenta-se como caso de estudo um dos trechos subterrâneos do maciço rochoso da antiga mina de volfrâmio das Aveleiras/Tibães (Mosteiro de Tibães, Braga, NW de Portugal). Além disso, apresenta-se uma proposta de zonamento geomecânico do maciço rochoso da antiga mina das Aveleiras/Tibães com o objetivo de apoiar o dimensionamento de maciços rochosos. Por fim, apresenta-se uma reflexão em termos de aplicabilidade, das potencialidades e das limitações da Calculadora Geomecânica **MGC-RocDesign|CALC**.

Keywords

Mining geomechanics, rock mass classifications, MGC-RocDesign|CALC software, Aveliras/Tibães mine.

Abstract

This work aims to emphasize the importance of geoenvironmental software use on the study of rock mass classifications for mining and geotechnical engineering. This research aims to demonstrate the importance of geomechanical classifications and geologic-geomechanical indexes, such as Rock Mass Rating (RMR), Rock Tunnelling Quality Index (Q-system), Surface Rock Classification (SRC), Rock Quality Designation (RQD), Geological Strength Index (GSI) and Hydro-Potential Value (HP). For this purpose a geomechanical calculator – **MGC-RocDesign|CALC**: : ***‘Mining Geomechanics Classification systems for rock engineering design (version beta)’*** – was created and developed to somehow make it simple, fast and accurate the study of rock mass classifications without having to appeal to manually use on tedious tables of classifications. The **MGC-RocDesign|CALC** was developed in Microsoft Excel™ spreadsheet software in Visual Basic for Applications® shell providing an environmental data loading more appealing to the user. That calculator was integrated with a previous one called *Geotech|CalcTools*, which merge the spread sheets *ScanGeoData|BGD* and *SchmidtData|UCS* created by Fonseca et al. (2010). All the information was integrated on a Geographic Information System mapping platform. A case study of the underground rock mass sections of the Aveliras/Tibães wolfram mine (Tibães Monastery, Braga, NW Portugal) is presented. In addition, a proposal of the geomechanical zoning of the rock mass for the old mine of Aveliras/Tibães was presented, in order to support the rock engineering design. Finally, we present some remarks about the applicability, capabilities and limitations of Geomechanical Calculator **MGC-RocDesign|CALC**.

Índice

1. Introdução geral	3
1.1. <i>Enquadramento</i>	3
1.2. <i>Objetivos</i>	10
1.3. <i>Organização</i>	12
2. Classificações geomecânicas: da teoria à prática	15
2.1. <i>Generalidades</i>	15
2.2. <i>Maçãos Rochosos: descrição e parâmetros geotécnicos</i>	16
2.2.1. Reconhecimento geológico.....	16
2.2.2. Cartografia de zonamento geotécnico.....	17
2.2.3. Parâmetros dos maciços rochosos.....	18
2.2.4. Parâmetros geológicos-geotécnicos das descontinuidades.....	23
2.3. <i>Técnica de amostragem linear aplicada cartografia das superfícies de descontinuidades</i> 27	
2.3.1. Metodologia.....	27
2.4. <i>Ensaio in situ</i>	31
2.4.1. Esclerómetro Portátil	31
2.5. <i>Ensaio Laboratoriais</i>	33
2.5.1. Ensaio de Carga Pontual (<i>Point Load Test, PLT</i>)	33
2.6. <i>Classificações geomecânicas mineiras</i>	36
2.6.1. Contexto histórico.....	36
2.6.2. RQD – <i>Rock Quality Designation</i>	46
2.6.3. RSR - <i>Rock Structure Rating</i>	47
2.6.4. RMR – <i>Rock Mass Rating</i>	49
2.6.5. SRC - <i>Surface Rock Classification</i>	59
2.6.6. M-RMR – <i>Mining Rock Mass Rating</i>	61
2.6.7. Q-System – <i>Rock Tunneling Quality Index</i>	71
2.6.8. Q _{TBM} – Q-system com recurso à tuneladora (TBM)	80
2.6.9. Correlação RMR – Q-System	82
2.7. <i>Índices Geológico-Geomecânicos</i>	85
2.7.1. GSI – <i>Geological Strength Index</i>	85
2.7.2. HP – <i>Hydro-Potential Value</i>	88
2.8. <i>Zonamentos Geotécnico e Geomecânico</i>	92
3. O aplicativo informático MGC-RocDesign Calc (<i>Mining Geomechanics Classification systems for rock engineering design</i>): considerações gerais	97
3.1. <i>MGC-RocDesign Calc: breve introdução</i>	97

3.2.	<i>Descrição do processo construtivo da MGC-RocDesign Calc</i>	101
3.3.	<i>Estrutura da MGC-RocDesign Calc</i>	102
3.4.	<i>Anatomia da MGC-RocDesign Calc</i>	105
3.5.	<i>O software</i>	105
3.5.1.	General Classification Systems / Sistemas de Classificações Gerais.....	107
3.5.2.	Geomechanical Classification Systems / Sistemas de Classificações Geomecânicas.....	114
3.5.3.	<i>Hydrogeomechanical Classification Systems</i> /Sistemas de Classificações Hidrogeomecânicas 118	
3.5.4.	GeoTech CalcTools - Rock Mass Database / Bases de Dados do Maciço Rochoso	119
3.5.5.	Outros botões de comando	122
4.	Exemplos de aplicação prática da MGC-RocDesign Calc: comparações, limitações e potencialidades	127
4.1.	<i>Considerações iniciais</i>	127
4.2.	<i>A antiga mina de volfrâmio das Aveliras (Tibães): exemplo de um maciço rochoso heterogêneo fraturado</i>	129
4.2.1.	Breve introdução	129
4.2.2.	Enquadramento regional	131
4.2.3.	Descrição da Mina das Aveliras	132
4.3.	<i>Mina das Aveliras: estudos de geotecnia mineira</i>	135
4.3.1.	Generalidades	135
4.3.2.	Estudo geológico, geotécnico e geomecânico mineiro.....	137
4.4.	<i>Aplicação da MGC-RocDesign Calc: maciço rochoso da mina das Aveliras</i>	144
4.4.1.	Avaliação geomecânica com recurso às classificações de maciços rochosos: uma síntese	144
4.4.2.	Avaliação geomecânica com recurso à MGC-RocDesign Calc: análise comparativa	154
5.	Conclusões	165
6.	Referências bibliográficas	169

Índice de figuras

Figura 1. Tipo de materiais geológicos (s.l.), desde os solos até às rochas duras, em estudos geotécnicos e de geologia de engenharia. In: Galiza et al. (2011b).	4
Figura 2. O ciclo das rochas numa perspetiva das geociências de engenharia: uma visão dinâmica da formação das rochas e dos solos, donde se destaca o posicionamento da mecânica das rochas e da mecânica dos solos. In: Galiza et al. (2011b).	4
Figura 3. Comparação relativa entre os principais tipos de descontinuidades nos maciços rochosos (adaptado de Price 2009). In: Galiza et al. (2011b).	6
Figura 4. Esquema das relações das geociências de engenharia, mecânica das rochas e mecânica dos solos, segundo a perspectiva da engenharia geotécnica (adaptado de Fookes et al. 2007). In: Chaminé (2010).	7
Figura 5. Esquema interdisciplinar das várias engenharias (Civil, Geotécnica, Geológica, Minas) e áreas disciplinares geo-científicas que, atualmente contribuem para o domínio científico mais vasto designado por “Geotecnia” (segundo Chaminé 2010).	7
Figura 6. Fluxograma esquemático com o procedimento conceptual de um projecto geotécnico (adaptado de Russo et al. 2001). In: Chaminé (2010).	9
Figura 7. Interações da geoestrutura dos maciços rochosos descontínuos vs. obras de engenharia (adaptado de Hudson & Harrison 2000, Hoek 2007). In: Chaminé (2010).	10
Figura 8. Bloco diagrama da representação do número de famílias de descontinuidades (adaptado de Scesi & Gattinoni 2009).	19
Figura 9. Procedimento de medição e exemplo de cálculo do RQD.	22
Figura 10. Técnica de amostragem linear (esquema adaptado de Hudson & Harrison 2000) e fotografia ilustrativa da técnica.	27
Figura 11. Ficha-tipo de levantamento geológico-geomecânico de campo com a aplicação da técnica de amostragem linear (arquivo LABCARGA).	29
Figura 12. Exemplo de aplicação das bases de dados ScanGeoData BGD para maciços rochosos fraturados (adaptado de Fonseca et al. 2010, Galiza et al. 2011a,b).	30
Figura 13. Ábaco de Miller para o cálculo da resistência a partir do martelo Schmidt (adaptado de González de Vallejo & Ferrer 2011).	32
Figura 14. Ficha-tipo de levantamento geomecânico de campo, com recurso ao martelo de Schmidt (Arquivo LABCARGA).	33
Figura 15. Ficha-tipo de registo das medições dos provetes submetidos ao ensaio de carga pontual (Arquivo LABCARGA).	34
Figura 16. Gráfico que estabelece a correlação entre a resistência à carga pontual e a resistência à compressão uniaxial, segundo a ISRM (1985).	35
Figura 17. Classificação empírica de estabilidade desenvolvida para túneis na África do Sul (adaptado de Hoek & Brown 1980).	38

Figura 18. Exemplos de instabilidade em túneis e rotura frágil do material (assinalada em tons acinzentados) em função do grau de fracturação (RMR) e do estado de tensão, adaptado de Hoek & Brown (1980 a, b).	.41
Figura 19. Esquemática da importância do sentido da escavação e a orientação das descontinuidades dominantes (adaptado de Hoek 2007).	42
Figura 20. Ábaco da classificação RSR – <i>Rock Structure Rating</i> para a definição do sustimento segundo Wickham et al. (1972, 1974). In: Hoek (2007).	49
Figura 21. Representação gráfica da obtenção do valor de RMR (adaptado de Bieniawski 1973).	50
Figura 22. Ábaco para a determinação da variação do RQD com o espaçamento médio das descontinuidades, através do RQD teórico (RQDt) para uma série de intervalos do valor limiar t (TRQDt – “theoretical RQD for a general threshold value t”), adaptado de Priest & Hudson (1976) e de Priest (1993).	52
Figura 23. Módulo de deformabilidade (E_M) versus valores de RMR e de Q (adaptado de Barton & Bieniawski 2008).	58
Figura 24. Ábaco do tempo de auto-suporte (horas) versus RMR, baseado em casos históricos segundo Bieniawski (1989). A conversão de RMR em Q segundo Barton (2000), (adaptado de Barton & Bieniawski 2008).	59
Figura 25. Ábaco da curva de seleção da rocha branda vs. IRS, em %, de rocha dura (adaptado de Laubscher 1990).	63
Figura 26. Ábaco do ajustamento do espaçamento (adaptado de Laubscher 1990).	64
Figura 27. Esquemas de rugosidade das superfícies de descontinuidades (adaptado de Laubscher 1990).	66
Figura 28. Ilustração esquemática dos ajustamentos para as tensões induzidas (Jakubec & Laubscher 2000).	68
Figura 29. Esquema da orientação das descontinuidades em função das tensões sujeitas que ditará o comportamento do maciço rochoso (adaptado de Laubscher 1990).	69
Figura 30. Esquemática para a obtenção do valor do <i>Q-system</i> .	72
Figura 31. Visão de conjunto dos parâmetros que são considerados no <i>Q-system</i> (adaptado de Barton 2007).	73
Figura 32. Ábaco para determinação do <i>Q-system</i> e da categoria do suporte (adaptado de Barton et al. 1974, Barton 2000, Grimstad & Barton 1993).	79
Figura 33. Ábaco síntese sobre o uso da “tunneling boring machine”, TBM (tuneladora) e a classificação Q_{TBM} (adaptado de Barton 2000).	81
Figura 34. Ábaco com correlações do <i>Q-system</i> com o RMR, baseado nas propostas de Grimstad & Barton (1993) e Barton (2000), (adaptado de Barton & Bieniawski 2008).	84
Figura 35. Ábaco para estimativa do GSI baseado na inspeção das condições geológicas (Marinos & Hoek 2000, Marinos & Hoek 2001), cuja versão sofreu atualizações em termos de quantificação da compartimentação (parâmetros F, Jc, Vb) propostas por Cai et al. (2004). Para pormenores sobre a aplicação dos parâmetros anteriores consultar Cai et al. (2004) ou Singh & Goel (2011).	87

Figura 36. Ábaco para estimativa do GSI baseado rochas metassedimentares (Marinos & Hoek 2001, Marinos et al. 2005, 2006).	88
Figura 37. Exemplos dos principais programas ou aplicativos informáticos internacionais disponíveis no mercado ou de utilização académica, uns específicos sobre classificações de maciços rochosos ou índices geomecânicos (casos do <i>ClasRock32</i> [RMR e Q-system], do <i>RMR Calc</i> [RMR], do <i>Combining RMR-Q-RMi</i> [RMR-Q-system], <i>Classmass</i> [RMR, Q-system], e do <i>RocData/RocLab</i> do pacote <i>RocScience</i> [®] [GSI]) e outros integrados em programas avançados de gestão geotécnica de grandes obras de engenharia de túneis (caso do <i>TIAS Database System – “Tunnel Information and Analysis System”</i> – de Marinos et al. 2013).	98
Figura 38. Esquema de organização ideal para um sistema de análise e informação integrada em túneis (inspirado no <i>TIAS Database System: Tunnel Information and Analysis System</i> de Marinos et al. 2013), com ênfase para as fases da aquisição dos dados geológico-geotécnicos e geomecânicos, com as respetivas calculadoras <i>GeoTech/CalcTools</i> e <i>MGC-RocDesign/Calc</i> , para se atingir o zonamento geomecânico do maciço rochoso e a aplicação das classificações dos maciços rochosos no apoio à decisão do dimensionamento do suporte.	100
Figura 39. Fluxograma conceptual para aquisição e descrição dos dados a partir da técnica de amostragem linear até à avaliação e classificação dos maciços rochosos.	103
Figura 40. Fluxograma conceptual relativo à aplicação das classificações dos maciços rochosos e proposta de solução de suporte.	104
Figura 41. Esquema ilustrativo das diversas etapas da programação em VBA [®] : a) Linguagem tipo usada na programação da <i>MGC-RocDesign/Calc</i> no MS. Excel [®] e VBA [®] ; b) Exemplo da programação de uma <i>textbox</i> ;	105
Figura 42. Acesso à <i>MGC-RocDesign/Calc</i> : introdução das credenciais pessoais.	106
Figura 43. Apresentação do Menu Principal que permite o utilizador aceder às diferentes classificações geomecânicas.	107
Figura 44. General Classification Systems / Sistemas de Classificações Gerais com <i>control tip text</i> ativado com o descritivo do RQD e os respetivos autores.	108
Figura 45. Apresentação da janela do Menu RQD com o <i>control tip text</i> associado.	108
Figura 46. Apresentação da janela do Menu RSR.	111
Figura 47. Ábacos referentes à classificação GSI tanto para maciços rochosos fraturados (especialmente, para “rochas ígneas ou metamórficas de alto grau”, por exemplo, rochas graníticas ou gnaisses), como para rochas heterogéneas metassedimentares (“rochas xistentas”).	112
Figura 48. Perspetiva dos ábacos com mais ou menos <i>zoom</i> e com o ajuste das <i>scrollbars</i>	112
Figura 49. Tabelas da constante <i>mi</i> na versão Portuguesa e Inglesa.	113
Figura 50. Geomechanical Classification Systems / Sistemas de Classificações Geomecânicas com.	114
Figura 51. Apresentação da janela do Menu RMR.	115
Figura 52. Apresentação da janela da classificação Q-system.	116
Figura 53. Apresentação da janela da classificação SRC.	117

Figura 54. Hydrogeomechanical Classification Systems/Sistemas de Classificações Hidrogeomecânicas com control tip text com a descrição do HP-value e os respetivos autores.	118
Figura 55 Apresentação da janela da classificação HP-value	119
Figura 56. <i>GeoTech/CalcTools - Rock Mass Database/</i> Bases de Dados do Maciço Rochoso.....	119
Figura 57. Fluxograma conceptual relativo à aquisição de dados do maciço rochoso: Entidade fundamental “Descontinuidade”	120
Figura 58. Apresentação da janela do menu da <i>ScanGeoData/BGD</i> (adaptado de Fonseca 2008, Ramos 2008 e Galiza 2013).....	121
Figura 59. Apresentação da janela do menu da base de dados dinâmica <i>SchmidtData/UCS</i> (adaptado de Fonseca 2008, Ramos 2008 e Galiza 2013).	122
Figura 60. Disposição dos botões de informação geral e complementar ao utilizador.	122
Figura 61. Figura ilustrativa das opções do botão ID.	123
Figura 62. Informação genérica sobre a <i>MGC-RocDesign/Calc</i> , onde se poderá encontrar a morada para contatos futuros.....	123
Figura 63. Apresentação da janela do menu <i>Credits</i>	124
Figura 64. Ilustração do botão “ <i>Geoengineering issues</i> ” e da bibliografia associada.....	124
Figura 65. Ilustração esquemática de síntese sobre a caracterização dos maciços rochosos e a utilização das classificações geomecânicas em engenharia de maciços rochosos, no dimensionamento/ <i>Design</i> de escavações subterrâneas ou túneis mineiros. (inspirado em Chaminé 2010).	128
Figura 66. Notícias sobre os trabalhos de pesquisa de volfrâmio na região de Mire de Tibães e sobre a exploração de volfrâmio de “Tibães” (ou Aveleiras) dadas à estampa em jornais da época: i) sobre as “Minas de Tibães” no “Comercio do Minho” (22/06/1916); ii) dos éditos de concessão no “Comércio do Porto” (9/09/1941), no “Diário do Minho” (9/09/1941) e no “Diário da Manhã” (11/09/1941). In: Lopes (2012)..	130
Figura 67. Enquadramento geológico regional de Mire de Tibães (adaptado de Ferreira et al. 2000). In: Trigo et al. (2013).	132
Figura 68. Aspectos diversos da antiga mina de volfrâmio das Aveleiras: a) esboço litológico do traçado subterrâneo e fotografias da entrada da mina, do seu interior e da vista aérea da Cerca do Mosteiro de Tibães; b) exemplo de sustimento em madeira original e esquema típico do manual “Arte Mineraria “ de Gerbella (1947); c) fotografia ilustrativa de trabalhos de pesquisa e processamento de minério de volfrâmio no Norte de Portugal (Minho), por volta de 1930 (adaptado de Meixedo et al. 2011 e de Lopes 2012). In: Trigo et al. (2013).	133
Figura 69. Exemplos do estado de degradação dos suportes de madeira (com mais de 50 anos) da mina das Aveleiras (a, b) e aspetos de locais de abatimento pontual nas galerias da mina das Aveleiras (c, d). In: Lopes (2012).	134
Figura 70. Aspetto das estruturas filonianas quartzosas observadas na mina das Aveleiras. In: Lopes (2012).	135

Figura 71. Cartografia das zonas geotécnicas mineiras da galeria principal G2 da mina das Aveleiras (adaptado de Pereira 2012; e levantamentos cartográficos geológico-mineiros inéditos de H.I. Chaminé e M.J. Afonso, 2006/2013).	141
Figura 72. Síntese cartográfica da rede de galerias estudada da Mina das Aveleiras, com a representação do zonamento geotécnico e uma tentativa de correlação (cf. Quadro 46, para processo de legenda geotécnica). (revisto e atualizado de Pereira 2012).	143
Figura 73. Representação do GSI para as zonas geotécnicas ZG1, ZG2 e ZG3 da Galeria 2 no ábaco de Marinos & Hoek (2001). Adaptado de Pereira (2012).	150
Figura 74. Representação do GSI para as zonas geotécnicas ZG4 e ZG5 da Galeria 2 no ábaco de Hoek & Marinos (2000), com atualizações de Cai et al. (2004). Adaptado de Pereira (2012).	150
Figura 75. Exemplo do relatório do RMR gerado automaticamente a partir da “Calculadora” <i>MGC-RocDesign/Calc</i>	153
Figura 76. Exemplo do relatório do Q-system gerado automaticamente a partir da “Calculadora” <i>MGC-RocDesign/Calc</i>	154
Figura 77. Mapa de zonamento RMR da mina das Aveleiras/Tibães (galeria G2).	157
Figura 78. Mapa de zonamento Q-system da mina das Aveleiras/Tibães (galeria G2).	158
Figura 79. Mapa de zonamento do índice HP-value da mina das Aveleiras/Tibães (galeria G2).	159
Figura 80. Mapa de zonamento geomecânico de síntese da mina das Aveleiras/Tibães (galeria G2).	160

Índice de quadros

Quadro 1.Reconhecimento geológico <i>in situ</i> (adaptado González de Vallejo & Ferrer 2011).	16
Quadro 2.Constituintes para a elaboração de um mapa geotécnico (adaptado Ferrer & González de Vallejo 2007).....	18
Quadro 3. Síntese da determinação do tamanho do bloco (ISRM 1978, González de Vallejo & Ferrer 2011).	20
Quadro 4. Classificação do tamanho dos blocos de material-rocha, baseado no índice volumétrico (J_v) das descontinuidades (adaptado de ISRM 1978).....	20
Quadro 5. Classificação dos maciços rochosos em função e forma do bloco (adaptado de ISRM 1978).	21
Quadro 6. Correlação entre o RQD e a qualidade do maciço (adaptado de Deere et al. 1967, Deere & Deere 1988).....	22
Quadro 7. Evolução do grau de alteração do maciço rochoso (adaptado da ISRM 1981).	23
Quadro 8. Principais parâmetros geológico-geotécnicos das descontinuidades (adaptado ISRM 1978, 1981, 2007, GSE 1995, Priest 1993, Brady & Brown 2004, Scesi & Gattinoni 2009, Palmström & Stille 2010, González de Vallejo & Ferrer 2011, Galiza 2013).....	25
Quadro 9. Classificação da resistência à compressão simples (adaptado de ISRM 1981).	31
Quadro 10. Síntese da geometria de corte para os ensaios PLT (adaptado de ISRM 1985).	35
Quadro 11. Grau de qualidade da Rocha (R0 a R6) correlacionada com a resistência à compressão simples e o índice de carga pontual $I_{s(50)}$, (adaptado de ISRM 1978, 1981, 1985).	36
Quadro 12. Síntese das principais classificações geomecânicas e índices geológico-geomecânicos usados em escavações subterrâneas ou mineiras (adaptado de Pereira 2012).....	45
Quadro 13. Classificação RSR – <i>Rock Structure Rating</i> (adaptado de Wickham et al. 1972, 1974).	48
Quadro 14. Descrição e pesos atribuídos à resistência para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).....	51
Quadro 15. Descrição e pesos atribuídos ao RQD para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski 1989).52	
Quadro 16. Descrição e pesos atribuídos ao espaçamento das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski 1989).	53
Quadro 17. Descrição e pesos atribuídos às condições geológico-geotécnicas das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski 1989).....	53
Quadro 18. Descrição e pesos atribuídos às condições das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).	54
Quadro 19. Descrição e pesos atribuídos às condições de percolação de água para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski 1989).	54
Quadro 20. Descrição da orientação das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski 1989).....	55
Quadro 21. Pesos atribuídos à orientação das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski 1989).....	55

Quadro 22. Parâmetros de projeto e propriedades do maciço rochoso (adaptado de Bieniawski 1993).....	56
Quadro 23. Classes do maciço rochoso determinado através da soma dos pesos parciais e tipos de escavação e sugestão das condições de suporte associados (adaptado de Bieniawski 1989).	57
Quadro 24. Classificação geomecânica SRC (adaptado de González de Vallejo 2003).	61
Quadro 25. Condições geotécnicas das descontinuidades e o efeito da presença de água (adaptado de Laubscher 1990).	67
Quadro 26. Grau de alteração na classificação M-RMR (adaptado de Jakubec & Laubscher 2000).	68
Quadro 27. Percentagens de ajuste aplicáveis à orientação das descontinuidades (adaptado de Laubscher 1990).	69
Quadro 28. Classificação das classes geomecânicas do maciço rochoso pela M-RMR (Laubscher 1990).	70
Quadro 29. Índice de qualidade da rocha, RQD (adaptado de Deere et al. 1967 e de Barton et al. 1974).	73
Quadro 30. Número de famílias de descontinuidades, J_n (adaptado de Barton et al. 1974).....	74
Quadro 31. Índice de rugosidade das descontinuidades, J_r (adaptado de Barton et al. 1974).....	74
Quadro 32. Índice de alteração das descontinuidades, J_a (adaptado de Barton et al. 1974).	75
Quadro 33. Fator de redução do caudal, J_w (adaptado de Barton et al. 1974).	75
Quadro 34. Síntese complementar dos parâmetros J_r e J_a estão claramente relacionadas com o comportamento da rocha (adaptado de Barton & Bieniawski 2008).	76
Quadro 35. Estado de tensão do maciço, SRF (adaptado de Barton et al. 1974).	77
Quadro 36. Tipos de escavação e valores de ESR – <i>Excavation Support Ratio</i> (adaptado de Barton et al. 1974).	78
Quadro 37. Valor de ESR a considerar para túneis TBM (Barton 2006, Hoek 2007). Para o caso dos túneis de tráfego dever-se-á utilizar o valor 0,5 no caso de túneis longos destinados a comboios de alta velocidade e de tráfego automóvel.	79
Quadro 38. Cálculo do comprimento de pregagens e ancoragens a partir de B, ESR e H (adaptado de Barton et al., 1974).	80
Quadro 39: Parâmetros usados nas classificações RMR e Q-system.	82
Quadro 40. Exemplos de correlações entre Q-system e RMR estabelecidas por diferentes autores.	83
Quadro 41. Avaliação da qualidade do maciço rochoso através do GSI (Hoek 1994, 2007).	86
Quadro 42. Descrição e pesos para o parâmetro J_{af} (adaptado de Hencher 1987, Harp & Noble 1993, Gates 1997, 2003).	90
Quadro 43. Descrição e pesos para o parâmetro J_k (adaptado de Freeze & Cherry 1979; Gates 1997, 2003).	91
Quadro 44. Descrição e pesos do parâmetro J_w (adaptado de Barton et al. 1974, Hencher 1987, Gates 1997).	91
Quadro 45. Síntese dos parâmetros geológicos-geotécnicos e geomecânicos para a unidade das corneanas/aplitóides no maciço da galeria G2 (Mina das Azeleiras). In: Pereira (2012).	138
Quadro 46. Síntese dos parâmetros geológicos-geotécnicos e geomecânicos para a unidade do granito no maciço da galeria G2 (Mina das Azeleiras). In: Pereira (2012).	139

Quadro 47. Síntese dos parâmetros do zonamento geotécnico do maciço rochoso da galeria mineira G2, Mina das Aveleiras (revisto e adaptado de Pereira 2012).....	140
Quadro 48. Aplicação da classificação geomecânica RMR à Galeria 2 – ZG1.....	145
Quadro 49. Aplicação da classificação geomecânica RMR à Galeria 2 – ZG2.....	145
Quadro 50. Aplicação da classificação geomecânica RMR à Galeria 2 – ZG3.....	146
Quadro 51. Aplicação da classificação geomecânica RMR à Galeria 2 – ZG4.....	146
Quadro 52. Aplicação da classificação geomecânica RMR à Galeria 2 – ZG5.....	146
Quadro 53. Aplicação da classificação geomecânica Q-system à Galeria 2 – ZG1.....	147
Quadro 54. Aplicação da classificação geomecânica Q-system à Galeria 2 – ZG2.....	147
Quadro 55. Aplicação da classificação geomecânica Q-system à Galeria 2 – ZG3.....	148
Quadro 56. Aplicação da classificação geomecânica Q-system à Galeria 2 – ZG4.....	148
Quadro 57. Aplicação da classificação geomecânica Q-system à Galeria 2 – ZG5.....	149
Quadro 58. Aplicação da classificação geomecânica HP-value à Galeria 2 – ZG1.....	151
Quadro 59. Aplicação da classificação geomecânica HP-value à Galeria 2 – ZG2.....	152
Quadro 60. Aplicação da classificação geomecânica HP-value à Galeria 2 – ZG3.....	152
Quadro 61. Aplicação da classificação geomecânica HP-value à Galeria 2 – ZG4.....	152
Quadro 62. Aplicação da classificação geomecânica HP-value à Galeria 2 – ZG5.....	153
Quadro 63. Valores de todas as classificações geomecânicas estudadas por Pereira (2012).....	156

Índice de equações

[1] Determinação do valor do RQD (%).	21
[2] RQD a partir de J_v , com base na proposta de Palmstrom (%).	21
[3] RQD a partir da frequência das descontinuidades (%).	22
[4] Cálculo do RSR - <i>Rock Structure Rating</i>	47
[5] Método de cálculo do RMR – <i>Rock Mass Rating</i>	56
[6] Correlação empírica entre RMR e o modo de deformabilidade da rocha intacta de acordo com Nicholson & Bieniawski (1990).	57
[7] Correlação empírica entre RMR e o modo de deformabilidade da rocha proposta por Serafim & Pereira (1983).	58
[8] Correlação empírica entre RMR e o modo de deformabilidade da rocha proposta por.....	58
[9] Correlação empírica entre RMR e o modo de deformabilidade da rocha proposta por Hoek &.....	58
[10] Fator de competência do estado de tensão.....	60
[11] Relação entre o <i>Mining RMR</i> e a tensão <i>in situ</i>	70
[12] Expressão que traduz o cálculo do <i>Rock Tunneling Quality Index</i>	71
[13] Dimensão equivalente da escavação.	78
[14] Dimensionamento do vão livre a partir do ESR.....	80
[15] Correlação empírica entre Q e módulo de deformabilidade segundo Barton et al. (1980) e Barton & Quadros (2002).	80
[16] Correlação empírica entre Q e módulo de deformabilidade segundo Barton et al. (1980) e Barton & Quadros (2002).	80
[17] Parâmetros usados para o cálculo do Q_{TBM}	80
[18] Critério de rutura de Hoek & Brown (1980).	85
[19] Critério de rutura generalizado de Hoek & Brown (1980).	85
[20] Relação entre GSI e RMR de acordo com Hoek (1990).	86
[21] Expressão que traduz uma variante do valor de Q.	87
[22] Expressão que traduz o Geological Strength Index através da variante do valor de Q.	87
[23] Expressão que traduz <i>Hydro-Potential (HP) value</i>	89
[24] Expressão que traduz o potencial geo-hidráulico do maciço.	92

Capítulo 1 – Introdução geral

1. Introdução geral

“No matter how many sophisticated rock Mechanics test programs and finite element analyses are performed, design engineers will come back to the basic question: “Is this bolt spacing, shotcrete thickness, or unsupported span width reasonable in the given rock mass?” (Barton et al. 1977)

1.1. Enquadramento

A presente dissertação está inserida na unidade curricular “Dissertação/Estágio /Projeto” do 2º ano do Curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Politécnico do Porto (IPP).

A tese enquadra-se no espírito das colaborações e projetos financiados, nomeadamente: HydroURBAN (“Hidrogeologia, geomecânica e geoconservação de antigas minas de água”; LABCARGA|ISEP-IPP|PADInv’2007/08), e GEOAVELEIRAS (“Mina das Azeleiras: estudo geológico-geotécnico e projeto da estrutura de reforço e de proteção”; IPPAR|Mosteiro de Tibães – Labcarga|ISEP (2006/2008). A área experimental do presente estudo enquadra-se nas investigações em geomecânica mineira desenvolvidas pelo Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA), bem como retoma, complementa e aprofunda, em parte, os estudos desenvolvidos por LABCARGA (2007/08), Pereira (2012) e Lopes (2012).

Só a partir de meados do Século XX foi encarado com especial interesse o estudo do comportamento geomecânico dos maciços rochosos e, em particular, do material-rocha para fins de engenharia (e.g., Terzaghi 1946, Talobre 1957, Hoek 1966, Coates 1967, Müller 1963, 1969, Jaeger 1979, Rocha 1981, Mello Mendes 1980a,b, Wittke 1990, Cunha & Muralha 1990, Dinis da Gama 1995, Brady & Brown 2004, Hoek 2007). Os trabalhos científicos até então centravam-se, sobretudo, no estudo da mecânica das rochas superficiais brandas, não consolidadas e/ou nos materiais desagregados vulgarmente designados por solos (e.g., Terzaghi 1925, 1943, Terzaghi & Peck 1987, Terzaghi et al. 1996), Figura 1. As rochas podem classificar-se, quanto à génese, em três grandes famílias (Figura 2): ígneas, metamórficas e sedimentares. Estas rochas são formadas num ciclo geodinâmico, interno e externo, contínuo ao longo dos tempos geológicos donde resultam para fins de engenharia (Freitas 2009), os designados maciços rochosos (rochas duras ou consolidadas) e maciços terrosos (rochas brandas ou solos), Galiza et al. (2011a,b).

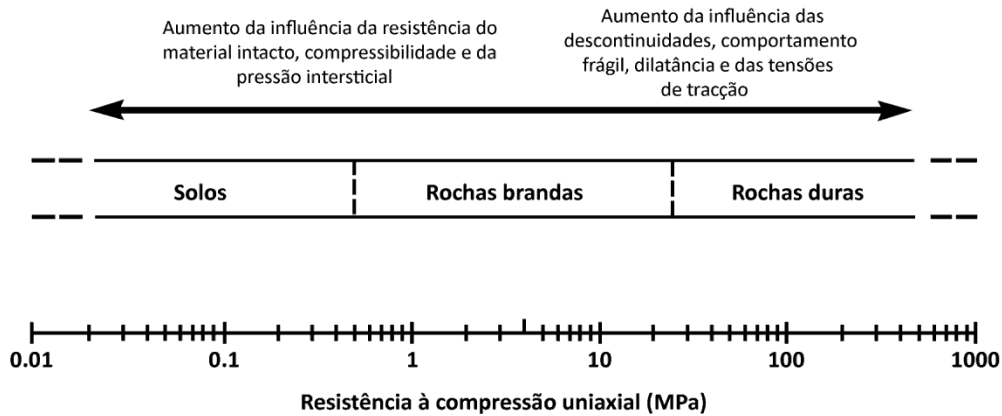


Figura 1. Tipo de materiais geológicos (S.I.), desde os solos até às rochas duras, em estudos geotécnicos e de geologia de engenharia. In: Galiza et al. (2011b).

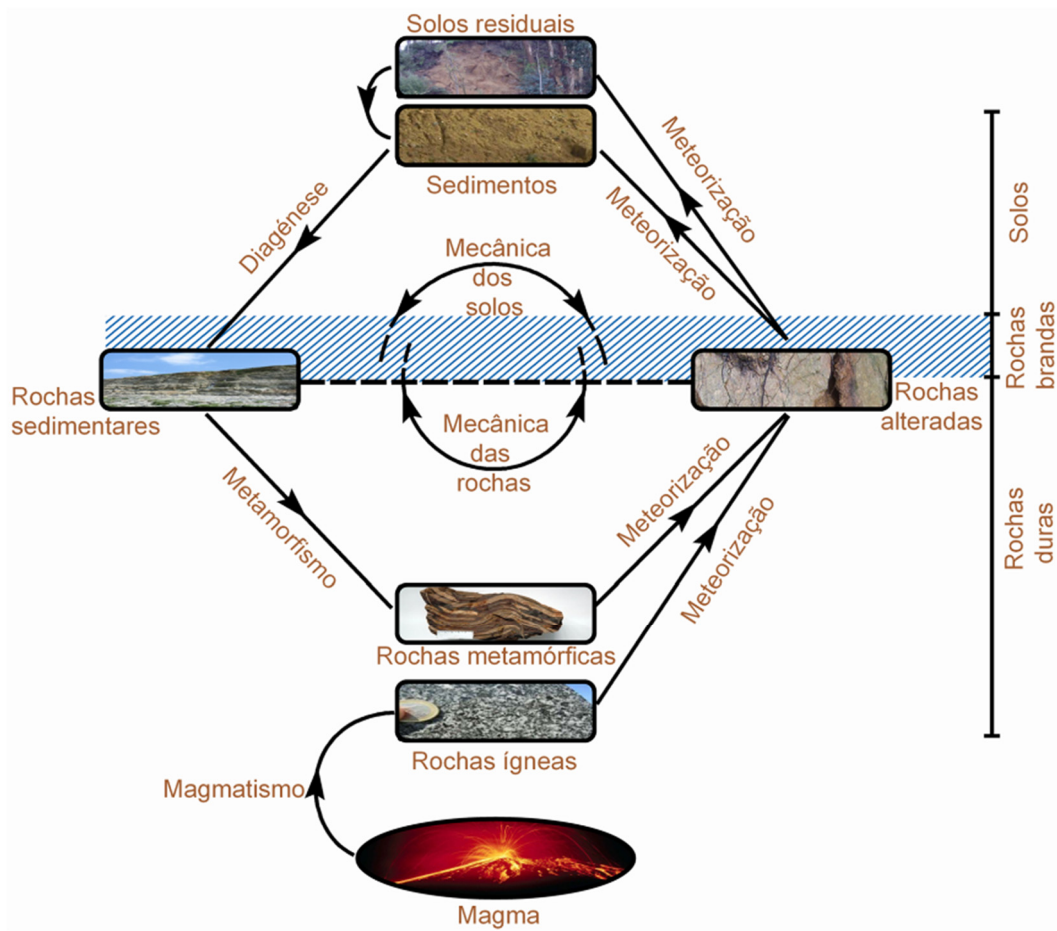


Figura 2. O ciclo das rochas numa perspetiva das geociências de engenharia: uma visão dinâmica da formação das rochas e dos solos, donde se destaca o posicionamento da mecânica das rochas e da mecânica dos solos. In: Galiza et al. (2011b).

Brown (1991) defende que em estudos de mecânica das rochas é primordial atingir um equilíbrio entre o realismo das suas bases de carácter físico-naturalista (geologia) e o rigor dos conceitos físico-matemáticos de que se serve para dar resposta a este tipo de investigações. Esta

importante dialética está bem expressa nas palavras de Rocha (1981) que ilustram de uma forma pragmática, e perfeitamente atual, a importância das geociências de engenharia (em particular, nas engenharias geológica, geotécnica e mineira): *“(...) O engenheiro não pode empreender a caracterização dos maciços rochosos somente a partir de resultados de ensaios. Na verdade, em primeiro lugar, a definição, em posição e número, dos pontos a ensaiar tem de ser guiada pelo conhecimento da geologia das formações e, em segundo lugar, em virtude da complexidade referida, o vasto património de conhecimentos qualitativos contidos na informação geológica desempenha papel decisivo na caracterização do maciço rochoso, a qual implica a extrapolação de resultados dos pontos ensaiados para outras zonas. (...)”*.

Os maciços rochosos podem, assim, ser definidos como massas rochosas constituídas por um ou mais tipos litológicos, localizados num determinado contexto espacial e estando afetadas por descontinuidades, com características geológico-geotécnicas, geomecânicas e geohidráulicas, que conferem ao conjunto uma anisotropia global (Hoek 2007).

Os maciços rochosos apresentam características geomecânicas que dependem, em primeiro lugar, da geologia das próprias rochas que os formam, mas também de alguns parâmetros geotécnicos que são intrínsecos de cada maciço e da sua história geotectónica (Hudson & Cosgrove 1997). Raramente, os maciços rochosos apresentam uma estrutura homogénea e, como resultado da complexa história geodinâmica (expressa pelo campo de tensão regional a que foram sujeitos), apresentam uma rede de descontinuidades que terão impactos significativos no seu comportamento geomecânico desde o nível do material-rocha até ao maciço rochoso (Rocha 1981, Dinis da Gama 1995, Galiza et al. 2011b).

O passado geomecânico dos maciços rochosos constitui um factor essencial para a compreensão do seu comportamento em função das causas naturais (sismos, vulcanismo, erosão, etc.) e as necessidades impostas pelas populações através das infraestruturas realizadas sobre eles ou da exploração das massas minerais (Dinis da Gama 1995). Com efeito, o material rochoso não é contínuo, apresentando geralmente descontinuidades macroscópicas (fraturas, diaclases, fissuras, falhas, cisalhamentos, etc.) e microscópicas (micro-fissuras, partição, defeitos cristalinos). A heterogeneidade dos maciços rochosos provém, por um lado, da anisotropia da rocha e, por outro lado, da persistência das famílias de descontinuidades que intersectam os maciços (Figura 3), Galiza et al. (2011b).

O estudo dos maciços rochosos é uma tarefa complexa e interdisciplinar que requer trabalho de campo minucioso e um processamento e análise cuidada dos dados obtidos sobre as suas

propriedades geológicas, petrofísicas, geotécnicas e geomecânicas (e.g., Terzaghi 1965, Mazzoccola et al. 1997, González de Vallejo & Ferrer 2011, Galiza et al. 2011b, Keaton 2013).

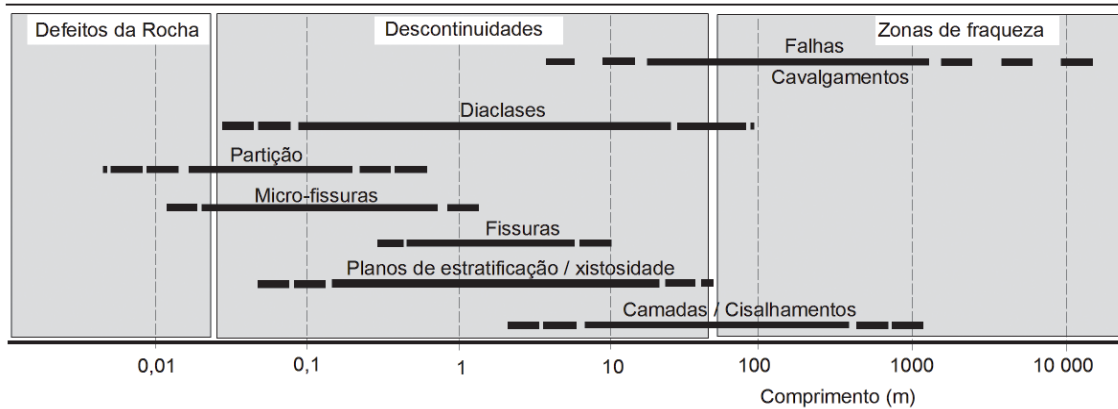


Figura 3. Comparação relativa entre os principais tipos de descontinuidades nos maciços rochosos (adaptado de Price 2009). In: Galiza et al. (2011b).

Nascimento (1990) considera o início da publicação (em Junho de 1948), da revista internacional *Géotechnique* da *Institution of Civil Engineers* (ICE), em Londres, como o reconhecimento formal da autonomia do domínio do conhecimento “Geotecnia”. Por essa altura a Geotecnia surge como uma necessidade da engenharia civil lidar e resolver os imensos problemas e desafios com as investigações *in situ* ligadas ao setor construtivo das várias obras de engenharia, especialmente os direcionados para as fundações e contenções de terrenos. De facto, as novas exigências de caracterização e prospeção dos maciços levaram, paulatinamente, ao aparecimento da geologia aplicada à engenharia (Desio 1949, Terzaghi 1965, Oliveira 1987) ou, modernamente, designada por geologia de engenharia (Freitas 1994, Hatheway et al. 2004, Bock 2006, Price 2009, Freitas 2009, Keaton, 2013) e por geomorfologia de engenharia (Fookes et al. 2007, Griffiths & Stokes 2008), ou, de uma forma mais global, de geociências de engenharia (Chaminé et al., in press), Figura 4. Todavia, modernamente, a Geotecnia é exercida, de forma interdisciplinar, por uma panóplia de geo-profissionais (Chaminé et al. 2010), desde os geólogos de engenharia e os engenheiros geólogos mais relacionados com as fases prévias de estudo, de caracterização e de prospeção dos terrenos até aos engenheiros geotécnicos, engenheiros civis e engenheiros de minas mais ligados às fases de projeto e obra, desenvolvendo os estudos de dimensionamento, de modelação computacional e de monitorização geomecânica (Figura 5).

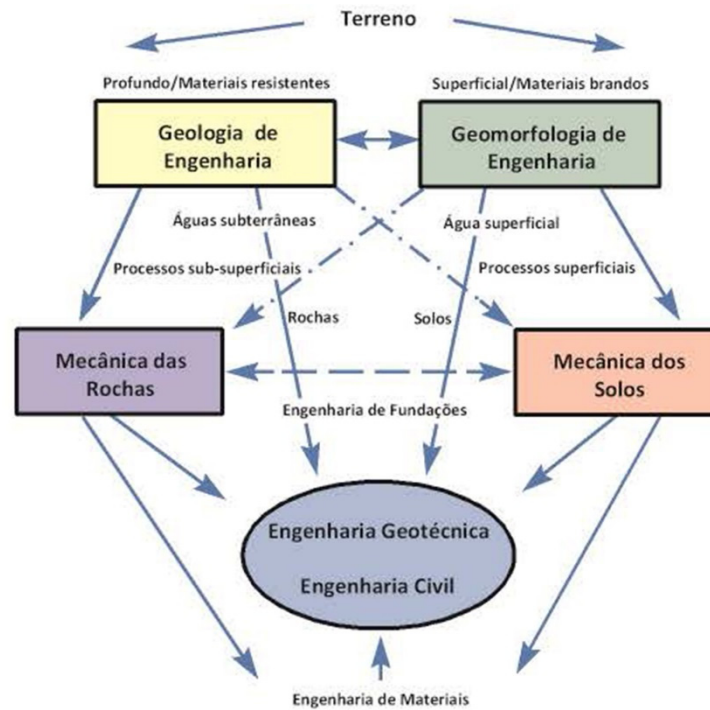


Figura 4. Esquema das relações das geociências de engenharia, mecânica das rochas e mecânica dos solos, segundo a perspectiva da engenharia geotécnica (adaptado de Fookes et al. 2007). In: Chaminé (2010).

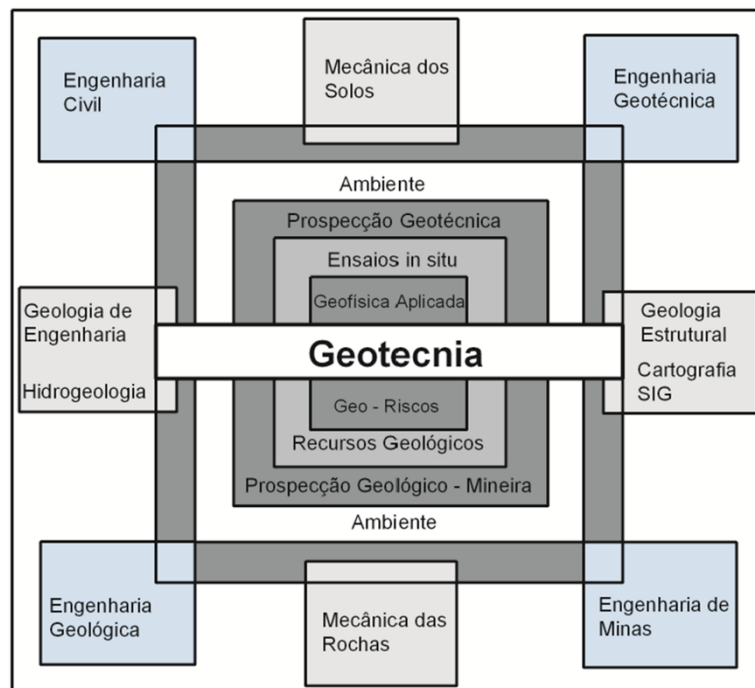


Figura 5. Esquema interdisciplinar das várias engenharias (Civil, Geotécnica, Geológica, Minas) e áreas disciplinares geo-científicas que, atualmente contribuem para o domínio científico mais vasto designado por “Geotecnia” (segundo Chaminé 2010).

Na atualidade, surgiu um novo domínio, ainda mais integrador e de maior abrangência, denominado por Geoengenharia (CERF 1994) e, ainda mais recentemente, por Ciências de Geoengenharia (Manoliu & Radulescu 2008).

O geotécnico ligado à engenharia dos maciços rochosos (“*Rock Engineering*”; e.g., Hoek 2007, Palmström & Stille 2010), procurará seguir uma orientação diferente do geotécnico ligado aos maciços terrosos (Terzaghi et al., 1996). Assim, recorrendo às modernas técnicas da geologia estrutural, da geologia de engenharia e da mecânica das rochas (e.g., Wittke 1990, Priest 1993, GSE 1995, CFCFF 1996, Hudson & Cosgrove 1997, Lisle & Leyshon 2004, ISRM 2007, Ragan 2009, Price 2009), o geotécnico ver-se-á perante a necessidade de avançar no sentido de apoiar os estudos dos maciços rochosos, num quadro mais quantitativo e dinâmico ao nível da aquisição de dados para o correto dimensionamento e projeto em obras de engenharia civil e/ou mineira (e.g., Brady & Brown 2004, Hoek 2007).

O estudo de um dado maciço rochoso é uma tarefa complexa que requer um trabalho de campo minucioso e uma análise cuidada dos dados obtidos sobre as características e as propriedades geológico-geotécnicas dos maciços (Mazzoccola et al. 1997, Keaton 2013, Chaminé et al., in press). Para tal efectua-se, em regra, uma recolha da informação de base, especialmente topográfica, litológica e geológico-estrutural, bem como das condições hidrogeológicas e geomorfológicas da área em estudo (e.g., Hudson & Cosgrove 1997, Vidal-Romani & Twidale 1999, Griffiths & Stokes 2008, González de Vallejo & Ferrer 2011). Nesta fase tentar-se delinear o modelo geológico conceptual. Seguidamente, caracteriza-se a compartimentação do maciço através do registo das características geológico-geomecânicas e petrofísicas das descontinuidades e do material rochoso (ISRM 1978, GSE 1995, CFCFF 1996, ISRM 2007). O estudo da caracterização do maciço culmina, geralmente, com a proposta do designado zonamento geotécnico e o estabelecimento, se possível, de um modelo conceptual geotécnico do maciço (González de Vallejo & Ferrer 2011, Galiza et al. 2011a,b,c). Seguidamente efectuar-se-ão uma série de ensaios *in situ* e laboratoriais para definir com maior rigor os valores dos parâmetros geotécnicos e geomecânicos do projecto para apoiar toda a fase de dimensionamento (*design*). O passo seguinte será o estabelecimento dos modelos geomecânicos comportamentais (antes e depois da obra) do maciço, apoiados em modelos matemáticos (se possível calibrados) e uma retro-análise (González de Vallejo & Ferrer 2011), Figura 6, (Chaminé 2010).

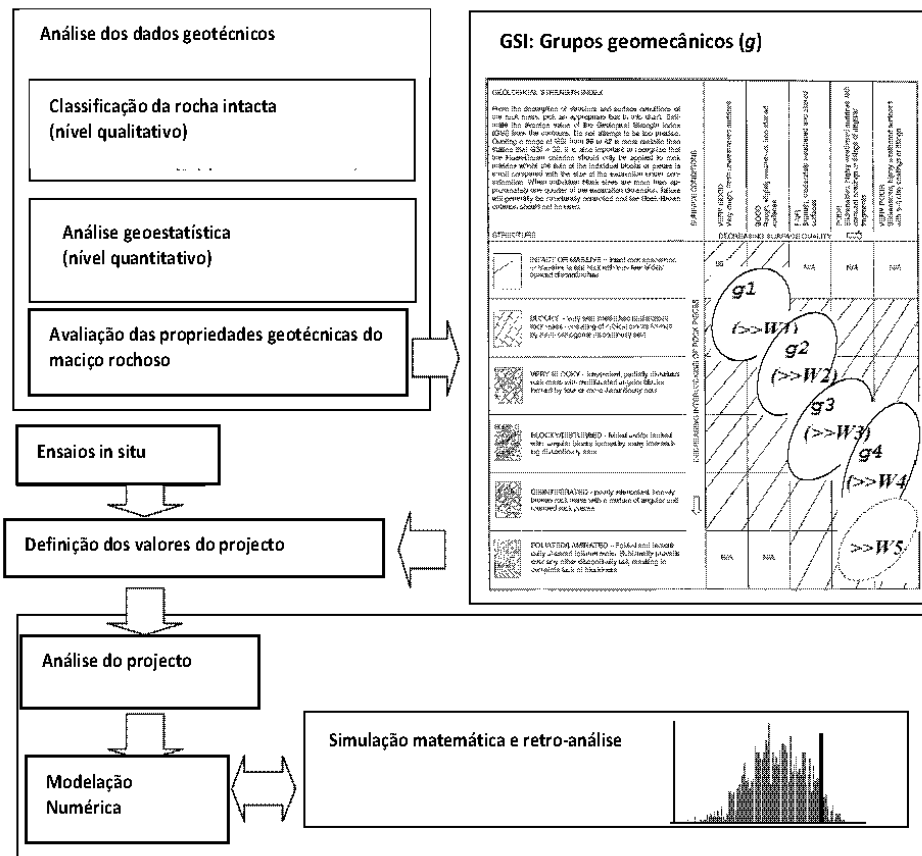


Figura 6. Fluxograma esquemático com o procedimento conceptual de um projecto geotécnico (adaptado de Russo et al. 2001). In: Chaminé (2010).

Tal como refere Rocha (1981) do ponto de vista da mecânica das rochas, designa-se por material rochoso ou, simplesmente rocha ou material-rocha, o material entre as superfícies de compartimentação de um maciço rochoso, i.e., o material dos blocos, completamente separados ou não, que essas superfícies determinam. De referir que os volumes de rocha que definem os “blocos”, separados por discontinuidades em termos de frequência e persistência, controlam as propriedades geotécnicas do conjunto rochoso em termos de deformabilidade e de resistência mecânica. A anisotropia dos maciços rochosos provém, por um lado, da anisotropia da rocha e, por outro lado, da persistência das famílias de discontinuidades que intersectam os maciços. Esta última contribuição é, em regra, a mais relevante, não só no respeitante à deformabilidade mas também à resistência à rotura dos maciços (Chaminé 2010), Figura 7.

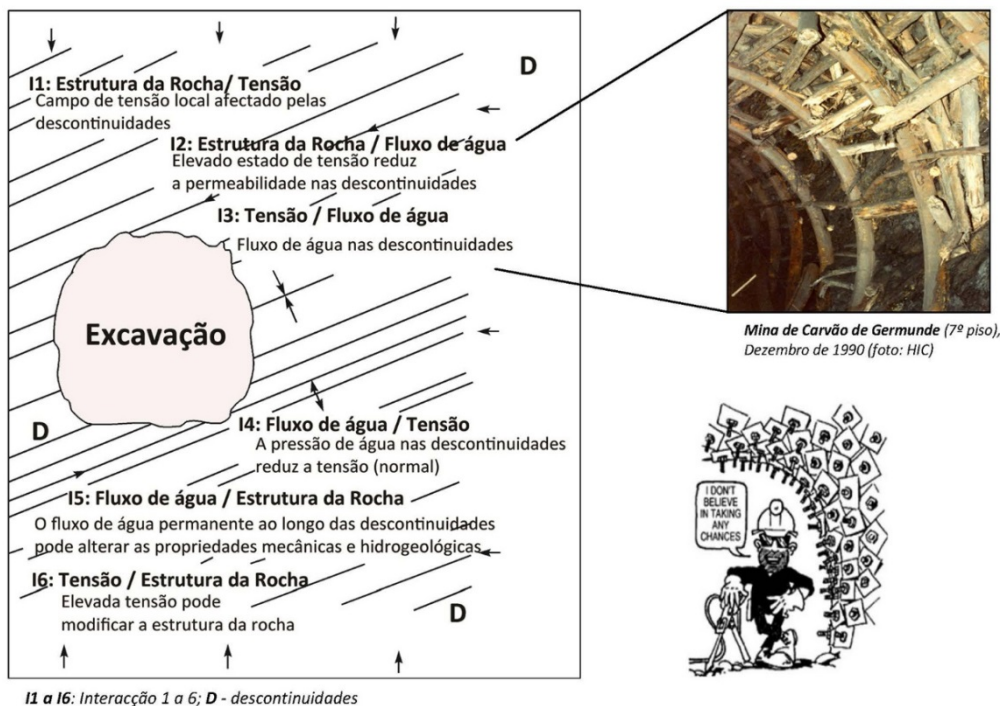


Figura 7. Interações da geoestrutura dos maciços rochosos descontínuos vs. obras de engenharia (adaptado de Hudson & Harrison 2000, Hoek 2007). In: Chaminé (2010).

1.2. Objetivos

Esta dissertação teve como objectivo geral apresentar a criação de um aplicativo informático aqui designado por “**Calculadora para classificações geomecânicas mineiras para o dimensionamento de maciços rochosos / Mining Geomechanical Classification Calculator for Rock Mass Design (version beta): MGC-RocDesign|Calc**”. Para o efeito, recorreu-se às classificações geomecânicas e índices geológico-geomecânicos e hidrogeomecânicos mais correntes utilizados na avaliação dos maciços rochosos e, em especial, em obras subterrâneas ou mineiras (e.g., Deere et al. 1967, Wickham et al., 1972, 1974, Bieniawski 1973, 1976, 1979, 1989, 1993, Barton et al. 1974, 1980, González de Vallejo 1983, 2003, Gates 1997, 2003, Barton 2006, Hoek 2007, Barton & Bieniawski 2008). Complementarmente, procedeu-se à integração nesta “Calculadora Geomecânica” de duas bases de dados dinâmicas relacionadas com a descrição geotécnica básica dos maciços rochosos (*Basic Geotechnical Description of Rock Masses (BGD)*; ISRM 1981) criadas e desenvolvidas por Fonseca et al. (2010) e Galiza et al. (2011a,b,c) tomando as denominações de **ScanGeoData|BGD** e de **SchmidtData|UCS** – pormenores em Fonseca (2008), Ramos (2008), Galiza (2013) – assumindo aqui a designação única de “**GeoTech|CalcTools: Rock Mass Database / Bases de dados de maciços rochosos**”.

Assim, apresentam-se como principais objetivos desta tese, os seguintes:

- Criação de um aplicativo informático original (baseado no *software* MS. Excel 2013[®])¹ aplicado ao desenvolvimento de uma calculadora aplicada às classificações geomecânicas de maciços rochosos – ***MGC-RocDesign|Calc (version beta)*** – no sentido de funcionar como uma ferramenta de apoio ao dimensionamento de suporte de escavações subterrâneas e à cartografia de zonamento geomecânico;
- Integração da “Calculadora Geomecânica” com as bases de dados dinâmicas geotécnicas ***ScanGeoData|BGD*** e ***SchmidtData|UCS*** (Fonseca et al. 2010) no sentido de apresentar a ferramenta ***GeoTech|CalcTools: Rock Mass Database***;
- Integração do aplicativo ***MGC-RocDesign|Calc*** num ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), em particular do ArcGIS da ESRI[®];
- Proceder ao teste sistemático em termos de robustez e de funcionalidade do aplicativo ***MGC-RocDesign|Calc*** com o intuito de se perceber as suas limitações e potencialidades;
- Preparação das listagens síntese (“relatórios”) e informação derivada gerada a partir do aplicativo ***MGC-RocDesign|Calc***;
- Utilização do aplicativo ***MGC-RocDesign|Calc*** num caso real (com controlo prévio da informação, da análise e dos resultados) – maciço rochoso metassedimentar e ígneo fraturado da mina de volfrâmio das Azeleiras/Tibães (Pereira 2012) – para se proceder à simulação e confronto da informação computacional com as investigações geotécnicas mineiras de terreno;
- Reflexão sobre as dificuldades, o aprofundamento, a otimização e a evolução para outras plataformas computacionais mais robustas e, sobretudo, da potencialidade desta ferramenta informática aplicada à geomecânica de meios rochosos fracturados contribuir para a delineação do modelo geomecânico comportamental.

¹ Segundo a programação em “Visual Basic”, constante no pacote informático Microsoft Office[®]. O MS. Excel 2013 é um programa da Microsoft[®] (<http://www.microsoft.com/>), todos os direitos reservados.

1.3. Organização

Este trabalho encontra-se organizado em vários capítulos, a saber:

- I. Sendo apresentado no presente capítulo introdutório o enquadramento geral da temática em estudo, os objetivos a atingir e a estruturação da dissertação;
- II. No capítulo 2 faz-se uma breve síntese sobre as classificações geomecânicas de maciços rochosos com ênfase para as aplicadas aos ambientes subterrâneos e mineiros. Neste capítulo esquematiza-se ainda os principais conceitos das geociências de engenharia e da mecânica das rochas subjacente aos princípios orientadores das classificações geomecânicas;
- III. No capítulo 3 apresenta-se as considerações gerais sobre o esquema conceptual da programação do aplicativo informático (“Calculadora Geomecânica”) *MGC-RocDesign/Calc* e a integração de outras bases de dados (*GeoTech/CalcTools*) numa plataforma SIG;
- IV. No capítulo 4 exemplificação da aplicabilidade da “Calculadora Geomecânica” recorrendo à análise de um caso real – maciço rochoso metassedimentar e granitóide da antiga mina de volfrâmio das Azeleiras/Tibães (Braga) – em que se esboça uma análise crítica com destaque das suas comparações, limitações e potencialidades;
- V. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais e apontam-se algumas perspetivas futuras;
- VI. No último capítulo, segue-se as referências bibliográficas e apresenta-se em anexo (Cd-Rom) a Calculadora Geomecânica *MGC-RocDesign/Calc*.

Capítulo 2 – Classificações geomecânicas: da teoria à prática

2. Classificações geomecânicas: da teoria à prática

“The systematic storage and evaluation of data is important in the field of tunnelling and geotechnics in general, since the project design, apart from the analytical and numerical methods, beneficiate also from the experience obtained from previous projects...” (Marinos et al. 2013)

2.1. Generalidades

As classificações dos maciços rochosos são de primordial importância para caracterizar e avaliar o comportamento dos maciços rochosos, bem como para apoiar o dimensionamento das estruturas de suporte e desenvolver medidas de prevenção de segurança e, por fim, contribuir para a economia das operações de desmonte e de suporte mineiro.

Tal como foi referido anteriormente o maciço rochoso pode ser definido como um conjunto de blocos de rocha justapostos e articulados entre-si. O material que origina a formação dos blocos é constituído por uma matriz rochosa, pelas superfícies estruturais que os limitam (rocha intacta), sendo geralmente considerado anisotrópico, descontínuo e heterogéneo (e.g., Peres-Rodrigues 1977, Rocha 1981, Cunha & Muralha 1990, Hoek 2007, González de Vallejo & Ferrer 2011).

O mesmo maciço rochoso poderá reagir de forma diferente às solicitações que lhe possam ser impostas. Estas reações dependem do tipo, das dimensões e das singularidades das obras de engenharia. Para uma antecipação ao seu comportamento será necessário avaliar as suas características em função do tipo de suporte que virá a ser implementado.

É necessário ter em conta a heterogeneidade geológica da área em estudo, uma vez que as características dos maciços diferem de região para região. É de notar que os atributos do meio rochoso condicionam o seu próprio comportamento devido às solicitações impostas pela obra em questão (Dinis da Gama 1995). Estes atributos serão evidenciados a partir da caracterização geológica e geotécnica e da avaliação geomecânica do próprio maciço.

A deformabilidade, a resistência mecânica, a permeabilidade hidráulica e o estado de tensão *in situ* (especialmente em obras subterrâneas profundas), são as características mais visadas no estudo da compartimentação dos maciços rochosos. Estes parâmetros podem ser obtidos através da caracterização geotécnica de terreno do maciço rochoso (ISRM 1978, 1981, GSE 1995, CFCFF 1996), complementada com a determinação dos índices e das propriedades petrofísicas avaliadas com recurso a ensaios de campo *in situ* e a ensaios laboratoriais (ISRM 2007).

2.2. Maciços Rochosos: descrição e parâmetros geotécnicos

2.2.1. Reconhecimento geológico

Para um bom reconhecimento geológico é necessário fazer uma análise e revisão de toda a informação disponível relativa à região objeto de estudo. Dever-se-á ter em linha de conta elementos de natureza topográfica e os constrangimentos da geologia, da morfotectónica, da hidrogeologia, da tectonossismicidade e de eventuais estudos geotécnicos que tenham sido executados. A análise dos elementos disponíveis poderá minimizar ou dispensar a realização de alguns tipos de estudos complementares (González de Vallejo & Ferrer 2011).

Assim com a recolha e todos os elementos bibliográficos analisados, proceder-se-á ao reconhecimento das superfícies expostas do maciço para obter informações necessárias que permitam avaliar o comportamento geotécnico dos maciços rochosos. Muitas das vezes o reconhecimento visual de superfície dos afloramentos rochosos permite tomar algumas decisões importantes, tais como as orientações mais adequadas para as obras em função da estrutura geológica e a heterogeneidade litológica. O objetivo deste reconhecimento permitirá uma melhor compreensão das unidades geológicas e das geoestruturas regionais numa escala que se adequa ao tipo, dimensão e fase de estudo da obra.

Como refere González de Vallejo & Ferrer (2011), o reconhecimento *in situ* deverá englobar, entre outros, os itens constantes no Quadro 1.

Quadro 1. Reconhecimento geológico *in situ* (adaptado González de Vallejo & Ferrer 2011).

Reconhecimento <i>in situ</i>	
Dados geológicos	Tipos de materiais, litologia e composição, contactos litológicos, estratificação e estruturas sedimentares; estrutura geológica e contactos tectónicos, grau de fracturação, descontinuidades, zonas de falha e atividade tectónica; formações superficiais, zonas de alteração e grau de meteorização; condições geomorfológicas, processos e evolução morfológica do terreno.
Descrição geotécnica de solos e maciços rochosos	Composição dos solos segundo o sistema unificado de classificação de solos (ASTM, 2010); propriedades importantes, entre outras, a cor do solo, a estrutura, a densidade e a consistência.
Descrição geotécnica de maciços rochosos	Caracterização da matriz rochosa e das propriedades do maciço rochoso e descrição das descontinuidades (ISRM, 1978, 1981).
Dados hidrogeológicos e hidrológicos	Níveis freáticos, inspeção de poços, nascentes; localização de aquíferos, materiais permeáveis e impermeáveis, zonas de recarga e drenagem, etc.
Instabilidades do terreno	Indícios ou sinais de deslizamentos ou desprendimentos, áreas de erosão intensa, zonas de subsidência e cavidades.
Acessos e condições de pesquisa	Localização de caminhos e vias de acesso para execução do reconhecimento <i>in situ</i> ; disponibilidade de água, eletricidade e autorizações do seu uso; seleção de locais possíveis para a execução de futuras campanhas de prospeção <i>in situ</i> .

2.2.2. Cartografia de zonamento geotécnico

A cartografia geotécnica é a matriz para os trabalhos de reconhecimento e caracterização, proporcionando o enquadramento necessário para os dados obtidos nestes trabalhos. No maciço rochoso dever-se-á distinguir os diferentes e diversos tipos de material rocha, assim sendo, dever-se-á ter em conta, sobretudo, a heterogeneidade litológica, a geoestrutura, o grau de fraturação, o grau de alteração, a geohidráulica e a resistência mecânica, permitindo uma divisão por zonas ou sub-zonas geotécnicas (ISRM 1981, GSE 1995, CFCCF 1996).

A cartografia geotécnica pode assumir várias denominações tais como (e.g., IAEG 1976, 1981a,b, Dearman & Eyles 1982, Griffiths 2002, Zuquette & Gandolfi 2004):

- Mapa geológico-geotécnico;
- Mapa geotécnico;
- Mapa de geologia de engenharia.

González de Vallejo & Ferrer (2011) e Price & Freitas (2009) indicam que as descrições fornecidas pela cartografia geológica (topografia, estrutura, litologia, etc.) permitem deduzir informação valiosa sobre as condições geológicas e geomorfológicas gerais dos maciços rochosos. Todavia, para serem aplicadas na engenharia geotécnica é necessário uma caracterização mais aprofundada. Para os autores supra-citados um mapa geotécnico deverá ter ainda mais aspetos que os acima referidos, tais como:

- Condições geomorfológicas e morfotectónicas;
- Propriedades petrofísicas e mecânicas dos geomateriais;
- Condições hidrogeológicas e hidrológicas superficiais;
- Características resultantes da atividade humana (e.g., minas e pedreiras).

Para a elaboração de um dado mapa geotécnico deverão ser considerados outros parâmetros adicionais de acordo com as especificações de cada projeto. No caso de existirem raros afloramentos ou se tiverem pouca extensão é recomendado (Carvalho & Chaminé 2004, Ferrer & González de Vallejo 2007) os aspetos constantes no Quadro 2.

Quadro 2. Constituintes para a elaboração de um mapa geotécnico (adaptado Ferrer & González de Vallejo 2007).

Elaboração de um mapa geotécnico	
Identificação do afloramento	Localização, situação geográfica, acessibilidade, extensão, características geométricas, etc.
Fotografia e esquemas de campo	Todos os aspetos pertinentes e fundamentais deverão ser documentados por fotografias e esboços de campo
Descrição geológica local	Caracterização das unidades geológicas regionais e/ou locais; descrição e caracterização das litologias e das macro e meso-estruturas; traços geológico-estruturais gerais do maciço; identificação das zonas alteradas e meteorizadas, bem como das espessuras; presença de água, exurgências, etc.; divisão em zonas e descrição geral de cada zona geotécnica.
Identificação de zonas singulares	Zonas com a existência de elementos estruturais não sistemáticos, as quais têm influência nas propriedades e comportamento geomecânico (e.g., falhas, filões, zonas de brecha, cavidades, zonas de fluxo de água, etc.).

2.2.3. Parâmetros dos maciços rochosos

Para González de Vallejo & Ferrer (2011), uma boa caracterização global do maciço rochoso deverá efetuar-se a partir dos dados obtidos no estudo dos afloramentos, juntamente com a descrição da petrofísica da matriz rochosa e das condições geotécnicas das descontinuidades, bem como deverão ser considerados outros aspetos representativos do conjunto, tais como:

- Número e orientação das descontinuidades;
- Dimensão do bloco unitário e intensidade da fracturação;
- Índice de qualidade da rocha (*Rock Quality Designation*, RQD);
- Grau de alteração.

Segundo a ISRM (1978), dependendo da área e o objetivo do estudo, deve ser cartografado, um universo de pelo menos 150 a 200 descontinuidades. O comportamento mecânico do maciço rochoso e os mecanismos de rotura estão condicionados, em grande parte, pelo número de famílias de descontinuidades. O grau de fracturação e o tamanho dos blocos são determinados pelo número de famílias de descontinuidades e pelo espaçamento de cada uma delas. A orientação no espaço, as propriedades e características dos planos estruturais caracterizam cada uma das famílias.

Através dos diagramas geológico-estruturais (especialmente os diagramas de contorno estrutural e os diagramas de rosetas) permitem-nos avaliar e analisar a orientação de cada descontinuidade e estimar a orientação média de cada família de descontinuidades (Priest 1993, Palmström & Stille 2010).

Para a classificação dos maciços rochosos de acordo com o número de descontinuidades são considerados os seguintes nove casos (ISRM 1978):

- Caso 1: maciço compacto com a presença de descontinuidades ocasionais aleatórias;
- Caso 2: uma família de descontinuidades;
- Caso 3: uma família e presença de descontinuidades aleatórias;
- Caso 4: duas famílias de descontinuidades;
- Caso 5: duas famílias de descontinuidades aleatórias;
- Caso 6: três famílias de descontinuidades;
- Caso 7: três famílias de descontinuidades aleatórias;
- Caso 8: quatro ou mais famílias de descontinuidades;
- Caso 9: maciço de rocha esmagada, com aspeto idêntico ao de um solo.

Através da construção de blocos-diagrama pode-se representar as famílias de descontinuidades, que permitem uma visualização espacial da sua orientação relativa do tamanho e forma do bloco da matriz rochosa (Figura 8).

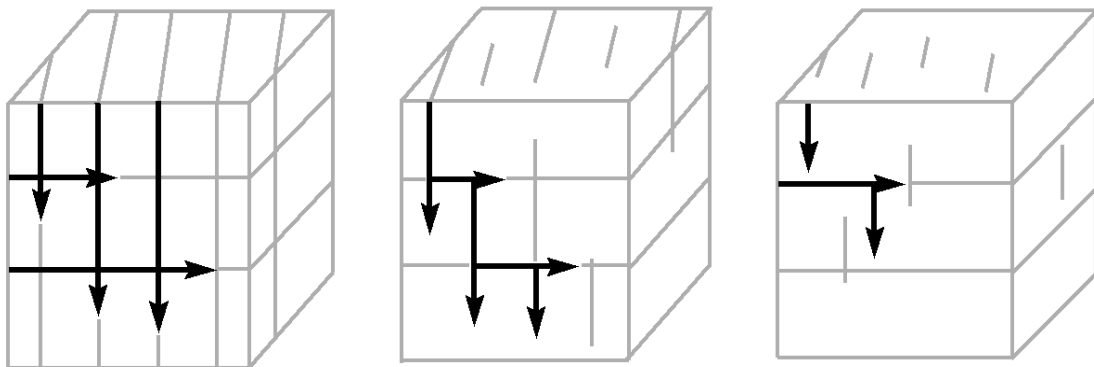


Figura 8. Bloco diagrama da representação do número de famílias de descontinuidades (adaptado de Scesi & Gattinoni 2009).

A importância da determinação do bloco unitário dos maciços rochosos é significativa. No caso de abertura de galerias e/ou desmonte de rocha, este parâmetro geomecânico determina em parte, onde esta abertura possa ocorrer ou não. A dimensão dos blocos que formam o maciço rochoso condiciona o seu comportamento, as suas propriedades de resistência e a sua deformabilidade. A forma do bloco unitário é determinada, em regra, a partir da orientação das descontinuidades e do número de famílias, enquanto a dimensão do bloco é determinada pelo seu espaçamento, continuidade e número de famílias de descontinuidades.

Para determinar o tamanho do bloco pode-se realizar das seguintes formas (ISRM 1978, Palmström & Stille 2010, González de Vallejo & Ferrer 2011), tal como sumarizadas no Quadro 3.

Quadro 3. Síntese da determinação do tamanho do bloco (ISRM 1978, González de Vallejo & Ferrer 2011).

Determinação do tamanho do bloco	
Índice do tamanho do bloco <i>I_b (Block Size Index)</i> e1 - espaçamento da família 1	$J_b = \frac{(e_1 + e_2 + e_3)}{3}$
Índice volumétrico das descontinuidades <i>J_v (Volumetric Joint Count)</i>	$J_v = \frac{\text{Número de descontinuidades}}{\text{Comprimento médio}}$
Frequência de descontinuidades λ	$\lambda = \frac{1}{\text{Espaçamento médio das descontinuidades}}$
	$\lambda = \frac{\text{Número de descontinuidades}}{L(m)}$

Através do parâmetro J_v (Quadro 4), é possível classificar o tamanho do bloco. Este parâmetro representa o número total de descontinuidades que intersejam uma unidade de volume ($1m^3$) do maciço rochoso (ISRM 1981). Para valores de $J_v > 60$, o maciço rochoso é classificado como blocos de rocha esmagada, tendo um comportamento como um solo residual. O parâmetro J_v é utilizado, normalmente, para estudos de compartimentação de maciços medianamente a pouco fraturados (maciços rochosos para pedreiras) e menos utilizado para maciços muito fraturados (maciços rochosos para produção de agregados).

Quadro 4. Classificação do tamanho dos blocos de material-rocha, baseado no índice volumétrico (J_v) das descontinuidades (adaptado de ISRM 1978).

J_v (descontinuidade/m^3)	Descrição
< 1	Blocos muito grandes
1 – 3	Blocos grandes
3 – 10	Blocos médios
10 – 30	Blocos pequenos
30 - 60	Blocos muito pequenos
> 60	Rocha esmagada

A ISRM (1978) definiu seis tipos de maciço rochoso (compacto, blocos, tabular, colunar, irregular e esmagado) que são apresentados no Quadro 5.

Quadro 5. Classificação dos maciços rochosos em função e forma do bloco (adaptado de ISRM 1978).

Classe	Tipo de maciço	Tamanho e características dos blocos
I	Compacto	Poucas descontinuidades ou espaçamento muito largo
II	Cúbico	Blocos aproximadamente equidistantes
III	Tabular	Blocos com uma dimensão (normalmente segundo a horizontal) consideravelmente menor que as outras duas
IV	Colunar	Blocos com uma dimensão (normalmente segundo a vertical) consideravelmente maior que as outras duas
V	Irregular	Grandes variações no tamanho e forma dos blocos
VI	Esmagado	Blocos com dimensões bastante pequenas

O grau de fracturação, índice RQD (*Rock Quality Designation*), proposto por Deere (1963) (com atualizações em Deere et al. 1967, Deere & Deere 1988) tem sido usado como índice da qualidade geotécnica da rocha. Este índice avalia a percentagem de rocha de “boa qualidade” observado em testemunho de sondagem. Apenas os testemunhos com dimensões maiores ou iguais a 10 cm serão contabilizados na soma dos fragmentos que foram recuperados. A obtenção deste parâmetro realiza-se através da seguinte expressão [1]

$$RQD = \frac{\sum \text{fragmentos com comprimento} > 10\text{cm}}{\text{Comprimento total do testemunho}} \times 100 \quad [1]$$

Outra forma de estimar o índice RQD em afloramentos, é o uso de correlações empíricas como a de Palmström (1975) [2]:

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

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

[2]

Através da frequência das descontinuidades (λ) é possível obter um valor teórico mínimo do RQD (Priest 1993), mediante a expressão [3]:

$$RQD \approx 100^{(-0.1 \times \lambda)} \times (0.1 \times \lambda + 1) \quad [3]$$

Segundo Deere et al. (1967), a qualidade mecânica de uma rocha é definida de acordo com a classificação do parâmetro RQD (Quadro 6).

Quadro 6. Correlação entre o RQD e a qualidade do maciço (adaptado de Deere et al. 1967, Deere & Deere 1988).

RQD (Rock Quality Designation) (%)	Descrição da qualidade do Maciço Rochoso
< 25	Muito fraca
25 – 50	Fraca
50 – 75	Razoável
75 – 90	Boa
90 – 100	Excelente

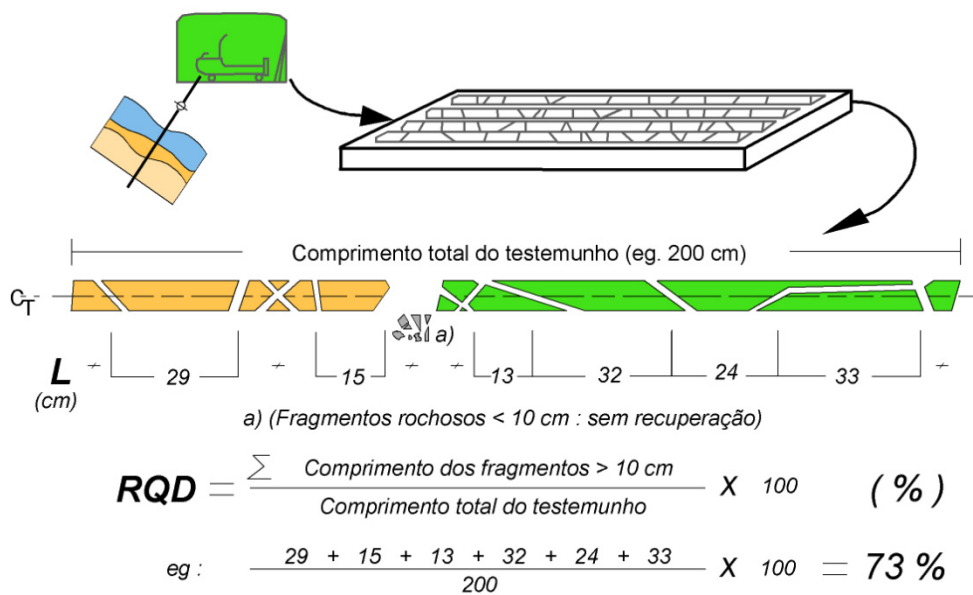


Figura 9. Procedimento de medição e exemplo de cálculo do RQD.

As características da qualidade dos maciços rochosos são fundamentalmente consequência do seu estado de alteração, do grau de fracturação e de circulação geo-hidráulica da água subterrânea. O grau de alteração resulta da transformação paulatina da rocha por processos químicos (Aires-Barros 1991). O reconhecimento do grau de alteração é inicialmente realizado por inspeção direta dos afloramentos, embora esta avaliação possa variar consoante experiência do observador. De acordo com a ISRM (1981) é possível classificar o grau de alteração em termos geotécnicos em 5 termos (Quadro 7), podendo estes serem simplificados em apenas 3 termos.

Quadro 7. Evolução do grau de alteração do maciço rochoso (adaptado da ISRM 1981).

Grau de alteração	Simbologia	Descrição
São ou não alterado	W_1	Não se observam sinais de alteração na matriz rochosa
Ligeiramente alterado	W_2	Mudanças na cor original da matriz rochosa (descoloração)
Moderadamente alterado	W_3	Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo, mantendo-se a petrofábrica original
Muito alterado	W_4	Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo; a rocha é muito friável
Completamente alterado ²	W_5	Todo o material rochoso está muito decomposto e/ou desagregado num solo residual

2.2.4. Parâmetros geológicos-geotécnicos das discontinuidades

Pode ser definido como discontinuidade o plano de origem geológica ou mecânica que separa ou isola os blocos de rocha intacta num dado maciço rochoso (González de Vallejo & Ferrer 2011). O estudo das discontinuidades é demasiado importante, pois as suas estruturas condicionam, de forma determinante, o comportamento dos maciços rochosos, essencialmente a deformabilidade, a resistência e a permeabilidade, podendo controlar a estabilidade do maciço rochoso.

Para a caracterização das discontinuidades de um maciço rochoso é necessário incluir os seguintes parâmetros (Quadro 8):

- Atitude geológica;
- Grau de alteração;

² Por vezes, na bibliografia (ISRM 1978, GSE 1995) é referenciado o termo W_6 , i.e., desagregação total do maciço podendo ser considerado como um autêntico solo residual.

- Espaçamento (*fracture intercept*);
- Continuidade;
- Rugosidade;
- Resistência mecânica das paredes;
- Abertura;
- Enchimento;
- Percolação de água.

Quadro 8. Principais parâmetros geológico-geotécnicos das discontinuidades (adaptado ISRM 1978, 1981, 2007, GSE 1995, Priest 1993, Brady & Brown 2004, Scesi & Gattinoni 2009, Palmström & Stille 2010, González de Vallejo & Ferrer 2011, Galiza 2013).

Parâmetro	Breve descrição	Equipamento e/ou processo de avaliação	Representação e/ou classificação	Esquema																																		
Atitude geológica	Engloba a direção e a inclinação de uma discontinuidade. O ângulo que uma linha horizontal do plano define com o Norte magnético é designado de direção e o ângulo que a reta de maior declive (perpendicular à direção) define com o plano horizontal designa-se por inclinação.	Bússola de Geólogo com clinómetro.	N65°E; 44°NW, assim a direção será N65°E e a inclinação 44°NW.																																			
Grau de fracturação (fracture intercept) e espaçamento	O grau de faturação (<i>fracture intercept</i>) corresponde à distância média entre as discontinuidades, independente da família de discontinuidades, que interseitam a linha de amostragem. O espaçamento corresponde à distância perpendicular entre duas discontinuidades adjacentes à mesma família. O espaçamento está associado ao grau de fraturação do maciço, quando maior for o grau de fraturação, menor será o espaçamento.	Fita graduada ao longo de um comprimento suficiente para ter uma indicação da frequência das discontinuidades.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Intervalo (cm)</th> <th>Nomenclatura</th> <th>Designação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>>200</td> <td>F1</td> <td>Muito afastadas</td> </tr> <tr> <td>60-200</td> <td>F2</td> <td>F1-2</td> </tr> <tr> <td>20-60</td> <td>F3</td> <td>F3</td> </tr> <tr> <td>6-20</td> <td>F4</td> <td>F4-5</td> </tr> <tr> <td><6</td> <td>F5</td> <td>Muito próximas</td> </tr> </tbody> </table>	Intervalo (cm)	Nomenclatura	Designação	>200	F1	Muito afastadas	60-200	F2	F1-2	20-60	F3	F3	6-20	F4	F4-5	<6	F5	Muito próximas																	
			Intervalo (cm)	Nomenclatura	Designação																																	
			>200	F1	Muito afastadas																																	
			60-200	F2	F1-2																																	
			20-60	F3	F3																																	
6-20	F4	F4-5																																				
<6	F5	Muito próximas																																				
Abertura	Designa-se por abertura de uma discontinuidade a medida perpendicular entre as paredes próxima dessa discontinuidade. A abertura tende a diminuir com a profundidade até se tornar fechada.	Régua graduada em milímetros, colocada perpendicularmente às paredes contíguas das discontinuidades.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Abertura (mm)</th> <th>Descrição</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><0,1</td> <td>Muito fechadas</td> </tr> <tr> <td>0,10-0,25</td> <td>Fechadas</td> </tr> <tr> <td>0,25-0,50</td> <td>Parcialmente abertas</td> </tr> <tr> <td>0,50-2,50</td> <td>Abertas</td> </tr> <tr> <td>2,50-10</td> <td>Medianamente amplas</td> </tr> <tr> <td>>10</td> <td>Amplas</td> </tr> <tr> <td>10-100</td> <td>Muito amplas</td> </tr> <tr> <td>100-1000</td> <td>Extremamente amplas</td> </tr> <tr> <td>>1000</td> <td>Cavernosas</td> </tr> </tbody> </table>	Abertura (mm)	Descrição	<0,1	Muito fechadas	0,10-0,25	Fechadas	0,25-0,50	Parcialmente abertas	0,50-2,50	Abertas	2,50-10	Medianamente amplas	>10	Amplas	10-100	Muito amplas	100-1000	Extremamente amplas	>1000	Cavernosas															
			Abertura (mm)	Descrição																																		
			<0,1	Muito fechadas																																		
			0,10-0,25	Fechadas																																		
			0,25-0,50	Parcialmente abertas																																		
			0,50-2,50	Abertas																																		
			2,50-10	Medianamente amplas																																		
>10	Amplas																																					
10-100	Muito amplas																																					
100-1000	Extremamente amplas																																					
>1000	Cavernosas																																					
Preenchimento	O preenchimento ou enchimento refere-se ao material que se encontra entre as paredes de uma discontinuidade. Esse preenchimento pode ser constituído por materiais ou minerais (argila, quartzo, rocha esmagada, etc.).	Inspeção visual. A mediação da espessura do enchimento é retirada diretamente com uma régua graduada em milímetros.	A classificação é feita de acordo com a tipologia do material constituinte do enchimento, por exemplo, argila mole, quartzo esmagado, etc.																																			
Rugosidade	A rugosidade está associada às irregularidades das paredes das discontinuidades. Este parâmetro influencia diretamente a resistência ao corte do maciço. Uma maior irregularidade das superfícies implica um maior atrito (aderência) entre as paredes, possibilitando assim uma menor ocorrência de rotura do maciço.	Inspeção visual, recorrendo à sensibilidade do tato e em comparação com a superfície padrão.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Classe</th> <th>Descrição</th> <th>Designação</th> <th>Forma de perfil</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>I</td> <td>Rugosa</td> <td>R₁₋₂</td> <td rowspan="3">Plana</td> </tr> <tr> <td>II</td> <td>Lisa</td> <td>Pouco rugosa</td> </tr> <tr> <td>III</td> <td>Estriada</td> <td>R₃</td> </tr> <tr> <td>IV</td> <td>Rugosa</td> <td>Medianamente rugosa</td> <td rowspan="2">Ondulada</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>Lisa</td> <td>Rugosa</td> </tr> <tr> <td>VI</td> <td>Estriada</td> <td>R₄₋₅</td> <td rowspan="3">Denteada</td> </tr> <tr> <td>VII</td> <td>Rugosa</td> <td>Muito rugosa</td> </tr> <tr> <td>VIII</td> <td>Lisa</td> <td></td> </tr> <tr> <td>IX</td> <td>Estriada</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Classe	Descrição	Designação	Forma de perfil	I	Rugosa	R ₁₋₂	Plana	II	Lisa	Pouco rugosa	III	Estriada	R ₃	IV	Rugosa	Medianamente rugosa	Ondulada	V	Lisa	Rugosa	VI	Estriada	R ₄₋₅	Denteada	VII	Rugosa	Muito rugosa	VIII	Lisa		IX	Estriada		
			Classe	Descrição	Designação	Forma de perfil																																
			I	Rugosa	R ₁₋₂	Plana																																
			II	Lisa	Pouco rugosa																																	
			III	Estriada	R ₃																																	
			IV	Rugosa	Medianamente rugosa	Ondulada																																
			V	Lisa	Rugosa																																	
			VI	Estriada	R ₄₋₅	Denteada																																
			VII	Rugosa	Muito rugosa																																	
VIII	Lisa																																					
IX	Estriada																																					
Continuidade ou persistência	É designado pelo comprimento superficial de uma discontinuidade. Este parâmetro torna-se difícil de quantificar em afloramentos, pois geralmente observam-se apenas dimensões aparentes. É aconselhável examinar sempre a extermindade da superfície, i. e., onde termina o comprimento da discontinuidade (rocha ou noutra discontinuidade). As características mecânicas que potenciam as superfícies de rotura, são influenciadas por este parâmetro.	Mede-se com uma fita graduada a extensão do traço da superfície da discontinuidade.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Continuidade</th> <th>Comprimento, L (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Muito pouco contínuas</td> <td><1</td> </tr> <tr> <td>Pouco contínuas</td> <td>1-3</td> </tr> <tr> <td>Medianamente contínuas</td> <td>3-10</td> </tr> <tr> <td>Muito contínuas</td> <td>10-20</td> </tr> <tr> <td>Extremamente contínuas</td> <td>>20</td> </tr> </tbody> </table>	Continuidade	Comprimento, L (m)	Muito pouco contínuas	<1	Pouco contínuas	1-3	Medianamente contínuas	3-10	Muito contínuas	10-20	Extremamente contínuas	>20																							
			Continuidade	Comprimento, L (m)																																		
			Muito pouco contínuas	<1																																		
			Pouco contínuas	1-3																																		
			Medianamente contínuas	3-10																																		
Muito contínuas	10-20																																					
Extremamente contínuas	>20																																					
Resistência das paredes das discontinuidades	Corresponde à resistência de compressão uniaxial nas paredes das discontinuidades. A deformabilidade e a resistência ao corte de um maciço rochoso são influenciadas pelo grau de resistência das paredes que as discontinuidades apresentam.	Esclerómetro portátil ou "Martelo de Schmidt".	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Classificação</th> <th>Resistência à Compressão Simples (MPa)</th> <th>Designação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S₁</td> <td>>200</td> <td>Muito elevada</td> </tr> <tr> <td>S₂</td> <td>60-200</td> <td>Elevada</td> </tr> <tr> <td>S₃</td> <td>20-60</td> <td>Média</td> </tr> <tr> <td>S₄</td> <td>6-20</td> <td>Baixa</td> </tr> <tr> <td>S₅</td> <td><6</td> <td>Muito baixa</td> </tr> </tbody> </table>	Classificação	Resistência à Compressão Simples (MPa)	Designação	S ₁	>200	Muito elevada	S ₂	60-200	Elevada	S ₃	20-60	Média	S ₄	6-20	Baixa	S ₅	<6	Muito baixa																	
			Classificação	Resistência à Compressão Simples (MPa)	Designação																																	
			S ₁	>200	Muito elevada																																	
			S ₂	60-200	Elevada																																	
			S ₃	20-60	Média																																	
S ₄	6-20	Baixa																																				
S ₅	<6	Muito baixa																																				
Percolação de água	A percolação de água é dada pelo fluxo de água livre que percorre as discontinuidades do maciço rochoso ou no próprio maciço como um todo. Esta percolação de água, mediante o seu fluxo, proporciona muitas vezes indicações de existência de possíveis problemas de instabilidade do maciço rochoso.	Inspeção visual e sensibilidade ao toque.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nomenclatura</th> <th>Designação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S</td> <td>Seco</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>Húmido*</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>Gotejante</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>Fluxo</td> </tr> </tbody> </table>	Nomenclatura	Designação	S	Seco	H	Húmido*	G	Gotejante	F	Fluxo																									
			Nomenclatura	Designação																																		
			S	Seco																																		
			H	Húmido*																																		
			G	Gotejante																																		
F	Fluxo																																					

* por vezes esta designação pode ser sub-dividida em ligeiramente húmido e húmido

2.3. Técnica de amostragem linear aplicada cartografia das superfícies de descontinuidades

2.3.1. Metodologia

A técnica de amostragem linear (*scanline sampling technique*), consiste basicamente, na colocação de uma fita graduada em superfícies expostas do maciço e na cartografia e registo de algumas características geométricas e mecânicas (propostas e recomendadas pela ISRM 1981) das descontinuidades intersectadas por essa fita graduada ao longo da sua extensão (Figura 10). Esta técnica está descrita, entre outros, por Priest & Hudson (1981), Hudson & Priest (1983), Priest (1993), Dinis da Gama (1995), Chaminé & Gaspar (1995), Peacock et al. (2003), Brady & Brown (2004), Peacock (2006), Martins et al. (2006) e Chaminé (2010).

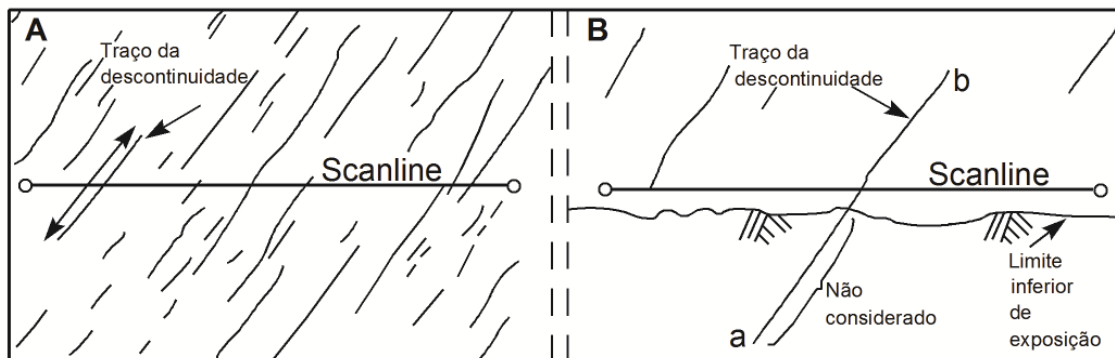


Figura 10. Técnica de amostragem linear (esquema adaptado de Hudson & Harrison 2000) e fotografia ilustrativa da técnica

Assim, em cada descontinuidade planar (seja uma estrutura sedimentar – laminação ou estratificação – ou uma foliação tectonometamórfica – clivagem xistenta ou xistosidade –, ou sejam as estruturas geológicas mais frequentes em maciços rochosos geradas em regime frágil ou dúctil-frágil – diaclase, falha, filão, foliações de fluxo, bandas de cisalhamento, etc.) que intersete a linha de amostragem, regista-se entre outras, as seguintes grandezas (e.g., Priest & Hudson 1981, ISRM 1981, Priest 1993, Dinis da Gama, 1995; Chaminé & Gaspar 1995, Brady & Brown 2004, Chaminé 2010):

- Distância à origem da fita graduada (D);
- Semi-comprimento exposto, ou seja, o comprimento visível da interseção da descontinuidade com a face exposta da rocha, apenas para um dos lados da fita graduada (L);
- Tipo de determinação que apresenta a extremidade da descontinuidade (T) – R: na rocha; D: noutra descontinuidade; O: obscura;
- Atitude da descontinuidade (direção e inclinação) medida junto ao ponto de interseção da linha de amostragem com a descontinuidade;
- Curvatura (C), contabilizada numa escala de C1 a C5, em que C1 representa superfícies planas e C5 superfícies muito curvas;
- Rugosidade (R), numa escala de R1 a R5, o R1 representa uma superfície lisa e o R5 uma superfície muito rugosa;
- Outras propriedades (e. g., percolação de água, abertura, preenchimento, etc.).

Todos os dados referentes a cada linha de amostragem são devidamente registados numa ficha de levantamento de descontinuidades, que para além das grandezas mencionadas, se encontram as seguintes:

- Número da descontinuidade;
- Localização da linha de amostragem;
- Orientação da linha de amostragem;
- Orientação do hasteal da galeria ou talude rochoso;
- Heterogeneidade da litologia;
- Grau de alteração;
- Data do levantamento;
- Responsável pelo levantamento;
- Observações.

A Figura 11 representa a ficha de levantamento geológico-geomecânico de campo com a aplicação da técnica da amostragem linear. A utilização de aplicativos informáticos relativos à compilação dos parâmetros geológico-geotécnicos (por exemplo, ScanGeoData|BGD e SchmidtData|UCS; cf. Fonseca et al. 2010, Galiza et al. 2011 a,b,c) – permite efetuar, entre outros, um cruzamento exaustivo de toda a informação e a interpretação dos dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos, de modo a apoiar o estabelecimento da cartografia de zonamento geotécnico de um dado maciço rochoso (Figura 12).

FICHA DE LEVANTAMENTO GEOLÓGICO-GEOMECÂNICO																																							
Técnica de Amostragem Linear (Scanline)																																							
ORIENTAÇÃO: da "Scanline": _____										UNIDADE GEOLÓGICA: _____										LOCALIZAÇÃO: _____																			
ALTURA A "SCANLINE"/SOLO (m): _____ DATA: _____																																							
DESCONTINUIDADE NÚMERO	DISTÂNCIA A ORIGEM (D)	LITOLOGIA	TIPO DE DESCONTINUIDADE	ATTITUDE		GRAU DE ALTERAÇÃO	GRAU DE FRACTURAÇÃO					ABERTURA			TIPO DE ENCHIMENTO	RUGOSIDADE		CONTINUIDADE	TERMINAÇÃO				CURVATURA		PRESEÇA DE ÁGUA	OBSERVAÇÕES													
				Directão	Inclinação		N1-W3M4	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	Fechada	Aberta		Muito Aberta	R _{1,2}		R _{1,3}	R	D	O	C _{1,2}	C _{3,4}															
(m)	(m)						(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(mm)	(mm)			(m)																							
1																																							
2																																							
3																																							
4																																							
5																																							
6																																							
7																																							
8																																							
9																																							
10																																							
11																																							
12																																							
13																																							
14																																							
15																																							
16																																							
17																																							
18																																							
19																																							
20																																							
21																																							
22																																							
23																																							
24																																							
25																																							
26																																							
27																																							
28																																							
29																																							
30																																							
31																																							
32																																							
33																																							
34																																							
35																																							
36																																							
37																																							
38																																							
39																																							
40																																							
41																																							
42																																							
43																																							
44																																							
45																																							
46																																							
47																																							
48																																							
49																																							
50																																							
51																																							
52																																							
53																																							
54																																							

Parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos segundo a ISRM (1978, 1981, 2007), GSE (1995)

Figura 11. Ficha-tipo de levantamento geológico-geomecânico de campo com a aplicação da técnica de amostragem linear (arquivo LABCARGA).

2.4. Ensaios *in situ*

2.4.1. Esclerómetro Portátil

O ensaio *in situ* realiza-se com recurso ao esclerómetro portátil (martelo de *Schmidt*). O equipamento foi desenvolvido em 1948 como ensaio de natureza não destrutiva (não existe modificação de forma permanente das propriedades físicas, químicas ou mecânicas do material ensaiado) de dureza do betão (Schmidt 1951), sendo usado mais tarde para determinar a dureza nas rochas (Cargill & Shakoor 1990).

O martelo de Schmidt permite estimar a dureza do material-rocha através do ressalto (*Rebound*, *R*) de uma massa de aço, que quando encostada sobre a superfície da rocha, sofre maior ou menos ressalto mediante a dureza que a rocha possa apresentar. Esse valor fica registado no próprio equipamento, variando numa escala de 10 a 100 (graduado de 2 em 2 valores) numa escala adimensional. O esclerómetro deve ser sempre colocado de forma perpendicular à superfície da rocha/maciço rochoso a ensaiar. Essa superfície deve ser, na medida do possível, limpa, sem camadas de detritos ou películas que possam falsear os resultados dos ensaios.

A ISRM (1981) recomenda que em estudos de geologia de engenharia ou de mecânica das rochas sejam executadas 10 medições em cada superfície ensaiada, sendo a média dos 5 valores mais elevados como valores representativos. A Figura 14 representa a ficha de levantamento geomecânico em campo com o uso do martelo de Schmidt. Com a obtenção do valor médio das medições, conhecida a densidade do material rocha e a orientação do martelo em relação à superfície ensaiada, recorre-se ao ábaco de Miller (Miller 1965), (Figura 13). Seguidamente, obtém-se o valor da resistência à compressão uniaxial, σ_c , do material ensaiado. As classes de resistência de compressão, segundo a ISRM (1981), são sistematizada em 5 termos de resistência (Quadro 9).

Quadro 9. Classificação da resistência à compressão simples (adaptado de ISRM 1981).

Resistência à Compressão Simples (MPa)	Classificação	Designação
> 200	S ₁	Muito elevada S ₁₋₂
60 – 200	S ₂	Elevada Elevada
20 – 60	S ₃	Média
6 – 20	S ₄	Baixa S ₄₋₅
< 6	S ₅	Muito baixa Baixa

Dispersão média de valores de resistência
para a maioria das rochas (MPa)

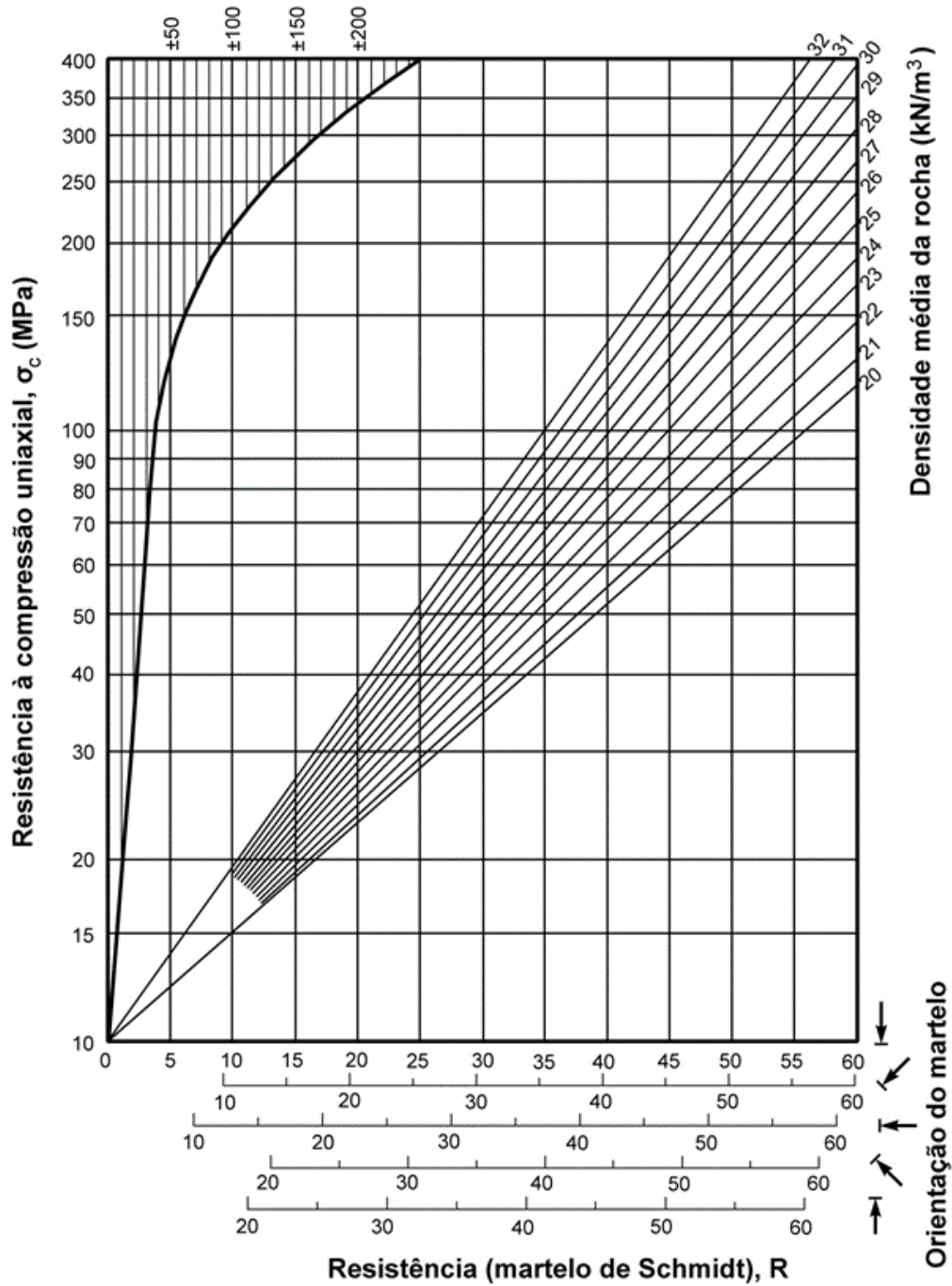
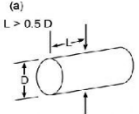
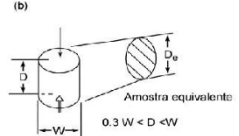
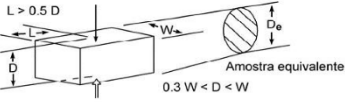
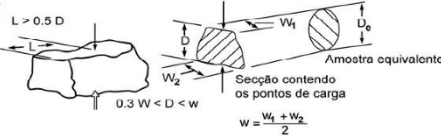


Figura 13. Ábaco de Miller para o cálculo da resistência a partir do martelo Schmidt (adaptado de González de Vallejo & Ferrer 2011).

Quadro 10. Síntese da geometria de corte para os ensaios PLT (adaptado de ISRM 1985).

Geometria dos provetes	Tipo de ensaio	Dimensões dos provetes	Índice de carga pontual (MPa) *	$I_{s(50)}$ **	Fator corretivo (F) ***
Cilindros	Axial e diametral	(a) 	$I_s = \frac{P}{De^2}$ (MPa)	$I_{s(50)}$	F = $\left(\frac{De}{50}\right)^{0.45} \approx \sqrt{\left(\frac{De}{50}\right)}$
		(b) 			
Prismas regulares	Diametral		$I_s = \frac{P}{De^2}$ (MPa)	$I_{s(50)} = F \times I_s$	F = $\left(\frac{De}{50}\right)^{0.45} \approx \sqrt{\left(\frac{De}{50}\right)}$
					

(a) Ensaio axial

(b) Ensaio diametral

* Índice de carga pontual (MPa)

** P é a carga aplicada (kN) que origina a rotura, e De é a diâmetro equivalente (mm). O valor obtido deverá ser corrigido para $I_{s(50)}$, valor este que corresponde a um D de 50 mm

*** Fator corretivo

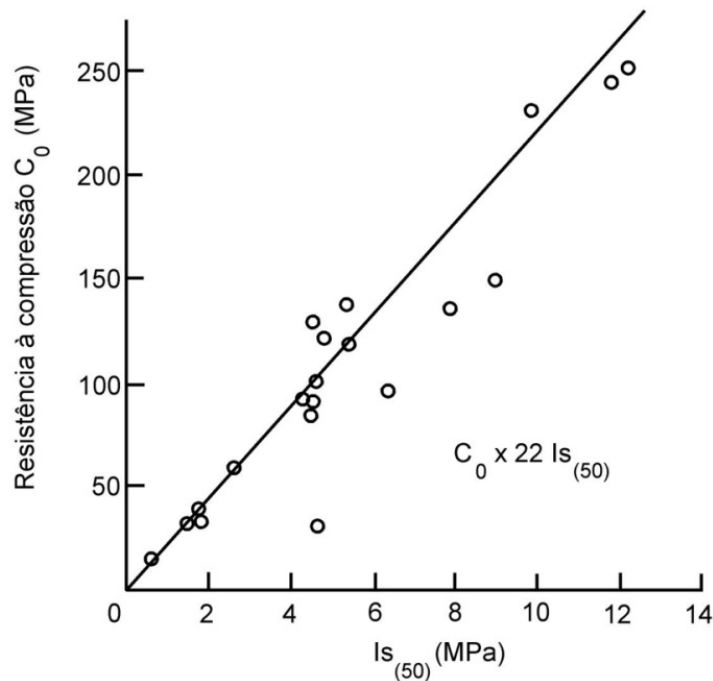


Figura 16. Gráfico que estabelece a correlação entre a resistência à carga pontual e a resistência à compressão uniaxial, segundo a ISRM (1985).

De outro modo é possível, a realização de ensaios expeditos com auxílio ao martelo de geólogo, que estima os valores da resistência à compressão do maciço rochoso. Pela classificação proposta pela ISRM (1978, 1981, 1985) em função do grau de qualidade da rocha, correlaciona a resistência à compressão simples e o índice de carga pontual ($I_{s(50)}$), com o comportamento do maciço rochoso face às análises expeditas (Quadro 11).

Quadro 11. Grau de qualidade da Rocha (R0 a R6) correlacionada com a resistência à compressão simples e o índice de carga pontual $I_{s(50)}$, (adaptado de ISRM 1978, 1981, 1985).

Grau R - Rock	Designação	σ_c (Mpa)	$I_{s(50)}$ (Mpa)	Análise expedita
R6	Extremamente elevada	>250	>10	A rocha lasca depois de consecutivos golpes de martelo e ressoa quando batida
R5	Muito elevada	100-250	4-10	Requer muitos golpes de martelo para partir espécimes intactos de rocha
R4	Elevada	50-100	2-4	Pedaços pequenos de rocha seguros com a mão são partidos com um único golpe de martelo
R3	Razoável	25-60	1-2	Um golpe firme e com o pico do martelo de geólogo faz indentações até 5mm; com a faca consegue-se raspar a superfície
R2	Branda	5-25	(*)	Com a faca é possível cortar o material, mas este é demasiado duro para lhe dar forma de provete para o ensaio triaxial
R1	Muito branda	1-5	(*)	O material desagrega-se com o golpe firme do pico do martelo de geólogo
R0	Extremamente branda	0,25-1	(*)	Consegue marcar-se com a unha

(*) Não são considerados minimamente fiáveis as correlações com a resistência à compressão simples.

2.6. Classificações geomecânicas mineiras

2.6.1. Contexto histórico

Com os avanços significativos nos domínios da caracterização geológico-geotécnica dos maciços rochosos (em termos de parametrização semi-quantitativa a quantitativa e sistematização qualitativa com uma base racional em termos classificativos; Milne et al. 1998) foram estabelecidos notáveis progressos nos últimos três decénios nos domínios da geologia de engenharia dos maciços rochosos (Price 2009). Com uma mudança progressiva do paradigma da geologia com uma base estritamente naturalista (Terzaghi 1965, Freitas 2009) para novas abordagens físico-matemáticas das geociências, em particular da geologia estrutural, da geomorfologia, da hidrogeologia e da geologia de engenharia, contribuíram de forma cabal para as novas práticas metodológicas de

recolha de dados nas investigações *in situ* e caracterização dos terrenos (Einstein 1991, Priest 1993, Hudson & Cosgrove 1997, Barton & Choubey 1977, Mandl 2005, Freitas 2009, Palmström & Stille 2010). A par disto a evolução permanente das ferramentas informáticas, do cálculo computacional e dos sistemas de informação geográfica permitiram uma nova atitude na prática das modernas geociências de engenharia. As recomendações e as normalizações nas áreas da geologia de engenharia e da mecânica das rochas propostas pela ISRM (*International Society for Rock Mechanics*), essencialmente os seus próprios documentos (ISRM 1978, 1981), recentemente compilados no *Blue Book* da ISRM (2007). Na elaboração deste tópico seguir-se-á de perto, além da bibliografia citada, as sínteses de: Bieniawski (1989), Barton (2006), Hoek (2007), Barton & Bieniawski (2008), Chaminé (2010), Singh & Goel (2011), Madureira (2012) e Pereira (2012).

Os maciços rochosos apresentam nos domínios da geoengenharia, interessantes desafios ao nível de caracterização/prospecção, de projeto e de dimensionamento dada a sua natural heterogeneidade e complexidade. Desta forma, a sua avaliação comportamental é de extrema importância para fins de engenharia e surge a necessidade de recorrer a métodos baseados na mecânica das rochas (Rocha 1981, Brown 1991). A avaliação e correlação de resultados obtidos por diferentes classificações geomecânicas, baseadas numa caracterização prévia do maciço rochoso, possibilitam o acesso a informação relativamente detalhada sobre o estado de tensão *in situ*, a qualidade do maciço, etc., e permitem prever o comportamento mecânico do mesmo face às condições a serem impostas aquando de uma dada escavação (Singh & Goel 1999, 2011). A caracterização geológico-geomecânica de maciços rochosos corresponde ao conjunto de informações obtidas através de investigações geotécnicas e de ensaios mecânicos dos maciços rochosos (Monticelli 1984), as quais servirão de base para a aplicação das classificações geomecânicas dada a instabilidade natural dos maciços (Figura 17).

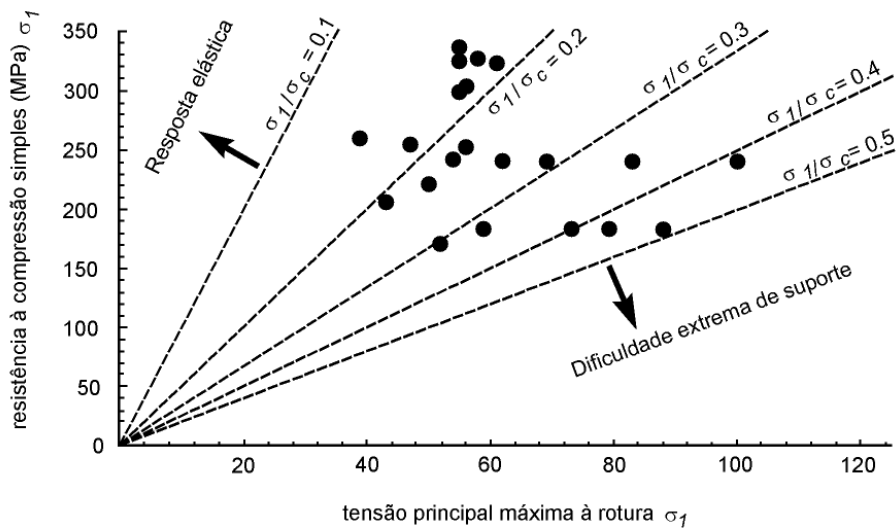


Figura 17. Classificação empírica de estabilidade desenvolvida para túneis na África do Sul (adaptado de Hoek & Brown 1980).

A experiência tem demonstrado que estas classificações podem ser uma ferramenta poderosa, quando usadas corretamente (Barton & Bieniawski 2008). Aliás, em vários projetos, a abordagem classificativa é a única base prática para o dimensionamento e apoio à construção de estruturas subterrâneas complexas (Singh & Goel 1999, 2011). De acordo com Bieniawski (1989), para o uso das classificações pressupõe atingir os seguintes objetivos:

- Identificar os parâmetros mais significantes que influenciam o comportamento do maciço;
- Dividir uma formação rochosa em particular em grupos de comportamento geotécnico semelhante, ou seja, em classes de qualidade;
- Fornecer uma base para compreender as características das diferentes classes de maciços;
- Relacionar as diferentes condições geológico-geotécnicas encontradas em locais distintos;
- Obter dados quantitativos e diretrizes para a prática de engenharia de projeto e dimensionamento;
- Fornecer uma base comum de comunicação entre os diferentes geo-profissionais (engenheiros e geólogos; Bock 2006).

Como vantagens da sua utilização, enunciam-se as seguintes reflexões (e.g., Terzaghi 1946, Wickham et al. 1974, Bieniawski 1989, Barton et al. 1980, Singh & Goel 1999, Barton 2006):

- Proporciona melhor comunicação entre todos os agentes envolvidos, nomeadamente, geo-profissionais, projetistas e donos de obra;
- As observações, a experiência e a decisão em engenharia são melhor correlacionadas e consolidadas através de um sistema de classificação quantitativo;
- A engenharia valoriza uma abordagem numérica, conseqüentemente, um sistema classificativo quantitativo tem uma aplicação considerável numa avaliação global da qualidade da rocha;
- As abordagens classificativas apoiam uma melhor sistematização e a organização do conhecimento.

Apesar do uso destas ferramentas ser bastante atrativo, é de referir que as classificações geomecânicas devem ser aplicadas de forma interdisciplinar, e usadas em conjunto com métodos observacionais e estudos analíticos para formular uma lógica de conceção global compatível com os objetivos de projeto e da geologia local (Bieniawski 1989, Bastos 1998, Medley 1999, Riedmüller & Schubert 1999):

- Universalidade dos pesos e parâmetros classificativos sem considerar as características singulares do maciço e do projeto;
- A anisotropia assim como o seu comportamento ao longo do tempo, não podem ser descritos num só valor;
- Não existe inter-relação entre os parâmetros que traduzam a influência da variação de um parâmetro nos demais;
- Existem inúmeras combinações possíveis para cada sistema para obtenção de um índice geomecânico;
- Nem sempre são contabilizados mecanismos de rotura, deformação e interação entre rocha e suporte;
- Os parâmetros de avaliação não são suficientes para selecionar parâmetros de projeto e de suporte;
- Não promovem a análise e a correta apreciação das condições do maciço rochoso, em particular a aplicação em meios heterogêneos, o que pode resultar num dimensionamento inadequado.

As propriedades do maciço rochoso que são avaliadas e consideradas, em regra, nas classificações geomecânicas são em termos genéricos as seguintes (Barton & Bieniawski 2008):

- Heterogeneidade litológica, geoestrutura e grau alteração;
- Resistência do material-rocha e das superfícies estruturais do maciço;
- Índice *Rock Quality Designation* (RQD);
- Espaçamento das descontinuidades e grau de fraturação;
- Atitude das descontinuidades e sua relação com o sentido da escavação;
- Condições e características geológico-geotécnicas das descontinuidades;
- Condições hidrogeológicas e geo-hidráulicas;
- Estado de tensão e deformabilidade.

Um método de classificação rigoroso torna-se mais fiável se a maioria dos parâmetros geológico-geotécnicos forem devidamente avaliados *in situ* ou em laboratório (Singh & Goel 1999, 2011). Em qualquer sistema classificativo, o menor valor corresponde ao maciço que se apresenta de má qualidade e o valor máximo corresponde a um maciço de excelente qualidade geomecânica (Figura 18 e Figura 19).

Os maciços rochosos são um meio por excelência, descontínuo, heterogéneo e anisotrópico que induzirá um comportamento geomecânico complexo dos materiais pétreos nas diferentes escalas da rocha intacta (e.g., Peres-Rodrigues 1977, Rocha 1981, Cunha & Muralha 1990, Miranda et al. 2006). Os maciços heterogéneos são de natureza mais complexa, pelo que, para a sua caracterização, se utilizam metodologias que combinam ensaios geotécnicos e classificações geomecânicas com ferramentas probabilísticas e/ou determinísticas.

Pela importância na prática da geoengenharia, foi rapidamente reconhecido, que com as classificações geomecânicas (ou classificações de maciços rochosos) foram melhoradas as primeiras abordagens descritivas, passando então a incluir elementos quantitativos de carácter geológico-estrutural, petrofísico, geotécnico, geohidráulico e geomecânico. Todavia, esta melhoria confinou o carácter empírico intrínseco, mas definitivamente colocou as classificações geomecânicas na prática de geoengenharia como uma poderosa ferramenta de análise diagnóstica das condições básicas geotécnico-geomecânicas. Estas classificações contribuem assim para apoiar o estudo comportamental de um dado maciço rochoso, aliada com a modelação baseada em modelos numéricos probabilísticos e/ou determinísticos. Assim, a seleção dos valores característicos dos parâmetros geotécnicos é um dos aspetos cruciais das

metodologias probabilísticas de avaliação da segurança, como é o caso das preconizadas no Eurocódigo (EC), (Matos Fernandes 2000). O EC7 estabelece que a escolha dos valores característicos das propriedades dos materiais geológicos deve basear-se nos resultados de ensaios de laboratório e de campo. A modelação e a segurança constituem, assim, as bases do dimensionamento, o que pressupõe a elaboração de modelos, a análise das ações e a avaliação das propriedades dos materiais e do risco associado à construção da obra, de onde decorre a formulação de critérios de segurança (Maranha das Neves 1994, Silva Cardoso 2004, Caldeira 2005). Estão reportados vários acidentes estruturais ocorridos ou patologias associadas, de modo súbito, nos maciços rochosos durante os trabalhos de escavação de obras (e.g., Dinis da Gama 1991, Ribeiro e Sousa 2004).

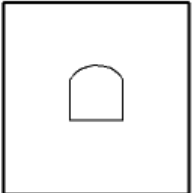
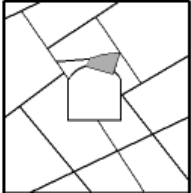
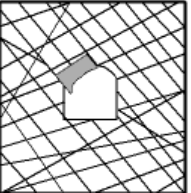
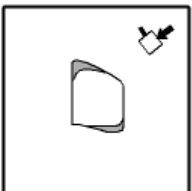

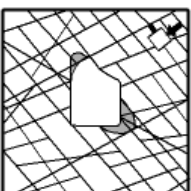
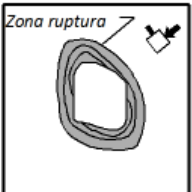
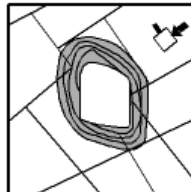
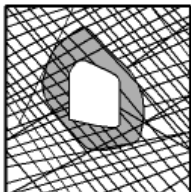
	Maciça (RMR>75)	Moderadamente fracturada (50>RMR<75)	Muito fracturada (RMR<50)
Tensão in situ baixa ($\sigma_1 / \sigma_c < 0.15$)	 Comportamento elástico-linear	 Escorregamento de blocos e cunhas	 Destaque de blocos da superfície da escavação
Tensão in situ intermédia ($0.15 > \sigma_1 / \sigma_c > 0.4$)	 Ruptura frágil adjacente ao limite da escavação	 Ruptura frágil localizada da rocha intacta e movimento de blocos	 Ruptura frágil localizada da rocha intacta e destaque ao longo das descontinuidades
Tensão in situ elevada ($\sigma_1 / \sigma_c > 0.4$)	 Ruptura frágil em torno da escavação	 Ruptura frágil da rocha intacta em torno da escavação e movimento de blocos	 Rochas deformáveis e expansíveis. Contínuo elástico/plástico

Figura 18. Exemplos de instabilidade em túneis e rotura frágil do material (assinalada em tons acinzentados) em função do grau de fracturação (RMR) e do estado de tensão, adaptado de Hoek & Brown (1980 a, b).

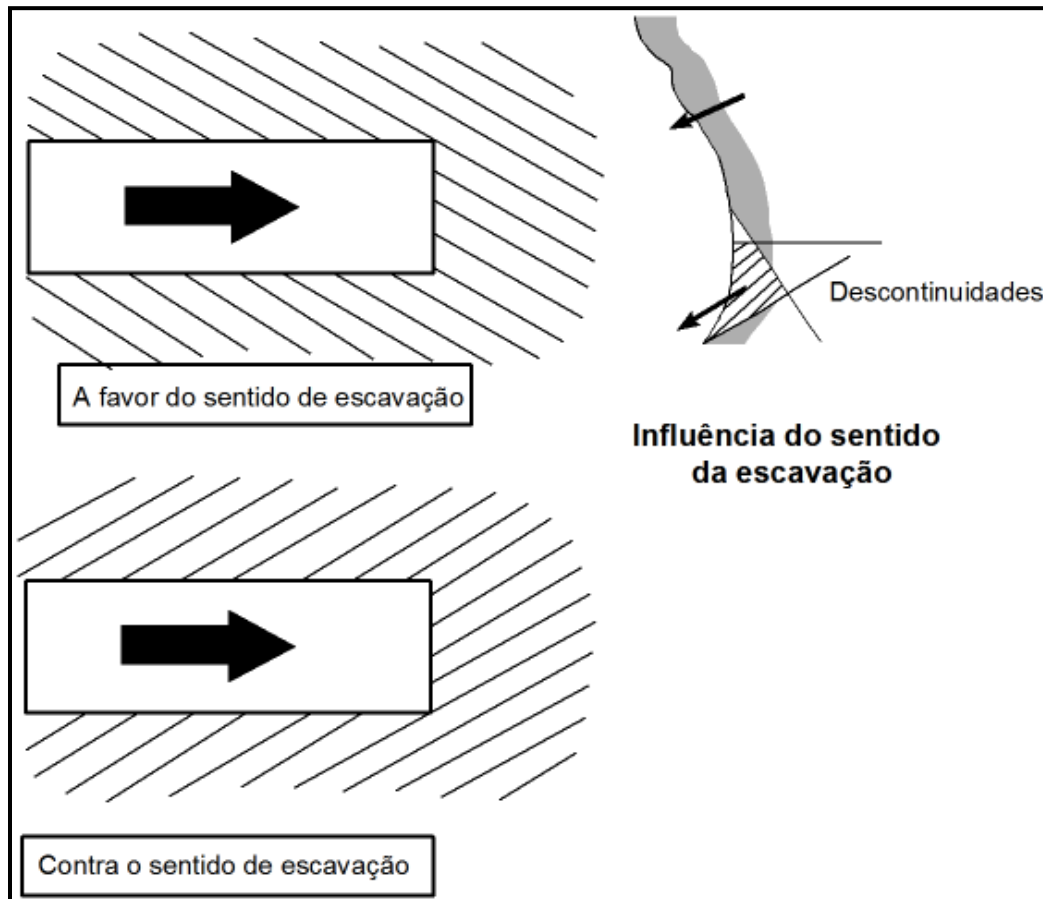


Figura 19. Esquematização da importância do sentido da escavação e a orientação das descontinuidades dominantes (adaptado de Hoek 2007).

No início da década de 1970, do século XX, as classificações geomecânicas mineiras de maciços rochosos surgiram de uma forma inequívoca como importantes ferramentas multi-paramétricas de auxílio aos projetos de dimensionamento do suporte de escavações subterrâneas e/ou mineiras (e.g., Wickham et al. 1972, 1974, Bieniawski et al. 1973, 1976, 1979, Barton et al. 1974, 1980). Uma vez estas classificações corretamente usadas serão uma ferramenta muito poderosa de apoio à decisão ao dimensionamento dos maciços rochosos, especialmente, pelos engenheiros geotécnicos, engenheiros de minas e engenheiros geólogos (Hoek & Brown 1980 a, b, Hoek 2007, Barton & Bieniawski 2008).

De notar que foram propostos inúmeros sistemas de classificação de maciços rochosos, mas deve-se a Ritter (1879) uma das primeiras sistematizações empíricas, com um certo formalismo, para a execução de determinadas obras subterrâneas, essencialmente túneis mineiros, que privilegia a determinação dos sistemas de suporte. Todavia, estas classificações surgiram previamente com um raiz descritiva e empírica, em meados dos anos 40, do século XX, com Terzaghi (1946). O artigo *Rock defects and loads on tunnel supports* de Terzaghi (1946) é uma das referências

incontornáveis na literatura internacional sobre túneis. Este artigo apresenta as bases da primeira classificação denominada por RLM-System (*Rock Load Mass Classification System*).

As sistematizações anteriores seriam um pouco limitadas, pois baseavam-se em descrições meramente qualitativas e observacionais dos maciços rochosos ou com uma avaliação quantitativa mono-paramétrica, tornando-as com algum grau de subjetividade e na dependência da maturidade técnica do avaliador (e.g., Terzaghi 1946). Com o acumular de experiência foram surgindo novas classificações, já com algum grau quantitativo, que viriam permitir uma melhor caracterização dos parâmetros geológico-geotécnicos dos maciços rochosos (Lauffer 1958, Deere 1963, Deere et al. 1967).

As classificações com base multi-paramétrica descritas por Wickham et al. (1972, 1974), Bieniawski (1973, 1976, 1979, 1989, 1993), Barton et al. (1974, 1980), são geralmente consideradas como as “fundadoras” das classificações numéricas de base multi-paramétrica para escavações subterrâneas. Atualmente, as classificações mais usuais são a RMR (*Rock Mass Rating*) e o Q-System (*Rock Tunnelling Quality Index*) de Barton & Bieniawski (2008). Estas classificações são usadas para a caracterização dos maciços rochosos na execução de escavações subterrâneas (túneis e minas). A classificação Wickham et al. (1972, 1974) não teve grande adesão na comunidade técnica havendo apenas reportado uma atualização do RSR (*Rock Structure Rating*) por parte de um dos co-autores da classificação (Skinner 1988). Porém, há outras classificações que são derivações das anteriores pela especificidade geomecânica da sua aplicação, como por exemplo, a RME – *Rock Mass Excavability* (Bieniawski et al. 2006, 2007), a MRMR – *Mining Rock Mass Rating* (Laubscher 1977, 1990, Laubscher & Jakubec 2000), a MBR – *Modified Basic RMR* (Kendorski et al. 1983), a SRC – *Surface Rock Classification* (González de Vallejo 1983, 2003), a SMR – *Slope Mass Rating* (Romana 1985, 1993, 1995), a RMI – *Rock Mass Index* (Palmström 1996, 2006, 2009), a QTBM – *Q-system for tunnel boring machine* (Barton 2000, 2006), a DMR – *Dam Mass Rating* (Romana 2003, 2004), o HP – *Hydro-Potential Value* (Gates 1997, 2003) e o GSI – *Geological Strength Index* (Hoek & Brown 1997, Hoek et al. 1998, a, b, Marinos & Hoek 2000, Marinos et al. 2005, Hoek 2007).

De ressaltar que não se deve manipular as classificações anteriores em termos de adulterar os seus pesos ou introduzir e/ou suprimir parâmetros, tal como refere Hudson & Harrison (2000): “(...) *The two main classification systems-those of RMR and Q-utilize six main parameters which are not the same. The developers of these systems have decided on which parameters are most important for tunnel design, and designed their classifications accordingly. Both proponents of the systems have warned users not to attempt to extrapolate the classification methods without modification and not to make predictions outside the original subjects for which the classification*

schemes were intended.”. Todavia, uma alternativa pragmática para se adequar uma classificação ao nosso problema é como propõe Hudson (1992) a adoção do *Rock Engineering System* (RES) segundo o qual, em função da obra de engenharia e dos seus objetivos, devem ser selecionados, de entre os parâmetros geotécnico-geomecânicos, aqueles que influenciarão decisivamente no comportamento da obra, atribuindo-lhes para tal, posteriormente, diferentes pesos consoante a sua importância prática para o caso em análise.

Na presente dissertação irão ser apresentadas em traços gerais as principais classificações geomecânicas utilizados na atualidade pela comunidade técnico-científica e os índices geológico-geomecânicos de particular interesse, a saber:

- *Rock Structure Rating* (RSR), de Wickham et al. (1972, 1974) e Skinner (1988);
- *Rock Mass Rating* (RMR), de Bieniawski (1973, 1976, 1979, 1989, 1993);
- *Rock Tunnelling Quality Index* (Q-system), de Barton et al. (1974, 1980) e Barton (2000, 2006), Barton & Bieniawski (2008);
- *Surface Rock Classification* (SRC), de González de Vallejo (1983, 2003), González de Vallejo & Ferrer (2011);
- *Rock Quality Designation* (RQD), de Deere (1963, 1989), Deere et al. (1967), Deere & Deere (1988), Li et al. (2009);
- *Geological Strength Index* (GSI), de Hoek & Brown (1997), Hoek et al. (1998), Marinos & Hoek (2000), Marinos et al. (2005);
- *Hydro-Potential Value* (HP-Value), de Gates (1995, 1997, 2003).

A maioria dos dados de base das classificações geomecânicas assenta numa série de parâmetros geológico-geotécnicos que podem ser compilados recorrendo à *Basic Geotechnical Description of Rock Masses* (BGD) da ISRM (1981), aliada à técnica de amostragem linear aplicada a superfícies expostas dos maciços rochosos (Dinis da Gama 1995, Chaminé & Gaspar 1995, Chaminé 2010), bem como complementarmente a todos os ensaios geomecânicos *in situ* e/ou em laboratório, previstos pela ISRM (2007).

Na presente dissertação serão apresentadas de forma generalizada as principais classificações geomecânicas e os índices geológico-geomecânicos utilizados na atualidade pela comunidade técnico-científica (Quadro 12).

Quadro 12. Síntese das principais classificações geomecânicas e índices geológico-geomecânicos usados em escavações subterrâneas ou mineiras (adaptado de Pereira 2012).

Classificação Geomecânica	Principais Parâmetros	Avaliação	Referências
RQD <i>Rock Quality Designation</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Descrição geológica dos testemunhos de sondagem; • Grau de fraturação do material-rocha. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geologia, tipo de rocha e estrutura geológica; • Grau de fraturação; • Qualidade geomecânica do maciço rochoso. 	Deere (1963); Deere et al. (1967); Deere & Deere (1988)
RSR <i>Rock Structure Rating</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Litologia, geoestrutura e resistência; • Espaçamento entre descontinuidades; atitude das descontinuidades, sentido da escavação subterrânea; • Caudal efluente à escavação, características geotécnicas das descontinuidades. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geologia, tipo de rocha e estrutura geológica; • Padrão da fraturação e sentido da escavação; • Água subterrânea e condições geotécnicas da escavação. 	Wickham et al. (1972, 1974); Skinner (1988); Hoek (2007).
RMR <i>Rock Mass Rating</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência do material-rocha (UCS - resistência à compressão uniaxial); • PLT - resistência à carga pontual); • Índice de qualidade da rocha, RQD; • Espaçamento das descontinuidades; • Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades; • Condições de percolação de água; • Orientação das descontinuidades em relação ao sentido da escavação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade geomecânica do maciço rochoso; • Coesão e ângulo de atrito do maciço rochoso; • Módulo de deformabilidade do maciço; • Período de auto-suporte; • Tipos de sustimento e dimensionamento; • Método de escavação. 	Bieniawski (1973, 1976, 1979, 1989).
SRC <i>Surface Rock Classification</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência do material-rocha (UCS - resistência à compressão uniaxial); • PLT - resistência à carga pontual); • Índice de qualidade da rocha, RQD; • Espaçamento das descontinuidades; • Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades; • Condições de percolação de água; • Orientação das descontinuidades em relação ao sentido da escavação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade geomecânica do maciço rochoso; • Coesão e ângulo de atrito do maciço rochoso; • Módulo de deformabilidade do maciço; • Período de auto-suporte; • Tipos de sustimento e dimensionamento; • Método de escavação; • Estado de tensão do maciço. 	González de Vallejo (2003); González de Vallejo & Ferrer (2011).
Q-system <i>Rock Tunnelling Quality Index</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Índice de qualidade da rocha, RQD; • Número de famílias de descontinuidades; • Rugosidade das descontinuidades; • Alteração das descontinuidades; • Condições de percolação de água; • Estados de tensão na envolvente da escavação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade geomecânica do maciço rochoso; • Módulo de deformabilidade do maciço; • Definição do sustimento e do revestimento. 	Barton et al. (1974, 1980); Barton (2006).
GSI <i>Geological Strength Index</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Descrição da geo-estrutura em termos de compartimentação e das condições geológico-geotécnicas das superfícies estruturais do maciço; • Resistência da rocha intacta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade geológico-geomecânica do maciço rochoso; • Módulo de deformabilidade do maciço; • Coesão e ângulo de atrito do maciço. 	Hoek & Brown (1997); Hoek et al. (1998); Marinos & Hoek (2000); Marinos et al. (2005).
HP-value <i>Hydro-Potential Value</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Índice de qualidade da rocha, RQD; • Número de famílias de descontinuidades; • Rugosidade das descontinuidades; • Abertura e forma das descontinuidades; • Condições de percolação de água nas descontinuidades. 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade hidrogeomecânica do maciço rochoso; • Previsão de potenciais problemas de infiltração. 	Gates (1995, 1997, 2003).

2.6.2. RQD – *Rock Quality Designation*

O RQD é um índice comumente usado para a descrição do estado da fracturação dos maciços rochosos (Goodman & Smith 1980, Milne et al. 1998, Li et al. 2009). O conceito de índice *Rock Quality Designation* (RQD) foi introduzido no início dos anos 60, do século XX, por Deere (1963) – *Technical description or rock cores for engineering purposes* – no sentido de quantificar a percentagem de material-rocha intacta aquando de uma sondagem com recuperação de testemunho. De destacar que, na época, para se proceder à caracterização da “qualidade” do material-rocha era prática corrente apenas com recurso à observação e descrição dos aspetos geológicos. O RQD foi desenvolvido, por volta de 1963, para apoiar projetos de escavação de túneis e largas cavernas no granito de Nevada (E.U.A.). Nos anos seguintes foi aplicado em projetos de túneis rodoviários em maciços rochosos quartzíticos, gnáissicos e xistentos na Carolina do Norte (Deere et al. 1967). Inicialmente o índice RQD foi desenvolvido para apoiar a previsão das condições geotécnicas dos túneis e os requisitos de suporte aquando do dimensionamento, bem como a sua aplicação estendeu-se através da correlação com as propriedades mecânicas *in situ* da rocha. Todavia, este importante índice foi incorporado como parâmetro básico, com ligeiras adaptações, em todas as classificações multi-paramétricas criadas posteriormente (em particular, RMR e Q-system). Tal como referido anteriormente o índice RQD permite avaliar a percentagem de rocha intacta a partir da recuperação de testemunhos de sondagem. Os fragmentos rochosos intactos de dimensão maior ou igual a 10 cm serão contabilizados no somatório dos fragmentos que sejam recuperados segundo o comprimento total da sondagem. Logo, os pequenos fragmentos de rocha (< 10 cm) e/ou rocha alterada não serão considerados (Deere 1963, Deere et al. 1967). Nos trabalhos anteriores foram propostos, pela primeira vez, propostas de fichas-tipo de registo, os conceitos de RQD e de testemunho de sondagem (*log*) da qualidade da rocha, juntamente com algumas correlações com índices de velocidade, de frequência das descontinuidades e valores do módulo de deformabilidade *in situ*. Foi apresentado no Quadro 6 a classificação da qualidade do maciço de acordo com a percentagem do RQD (Deere et al. 1967, Deere & Deere 1988, Deere 1989). Novos desenvolvimentos, aplicações e adaptações ao índice RQD foram efectuadas ao longo dos últimos decénios por diversos autores (e.g., Goodman & Smith 1980, Sen Z. 1984, Priest 1993, Sen Z 1990, Harrison 1999, Li et al. 2009). De destacar a proposta de Li et al. (2009) para a recomendação na utilização do RQD corrigido, geralmente, denominado por RQD_c.

2.6.3. RSR - *Rock Structure Rating*

Wickham et al. (1972, 1974) apresentaram um método quantitativo para descrever a qualidade do maciço rochoso tendo em vista a selecção do suporte mais indicado com base na classificação *Rock Structure Rating* – RSR (com actualizações em Skinner 1988). A maioria dos casos de estudo foi relativamente a pequenos túneis suportados por meio de estruturas em aço, embora este sistema foi o primeiro a fazer referência ao suporte com betão projetado e sendo a primeira sistematização a atribuir pesos baseados em parâmetros (Hoek 2007).

O RSR baseia-se na seguinte expressão [4]:

$$RSR = A + B + C \quad [4]$$

Sendo:

A – relacionado com a geologia, i.e., refere-se à síntese das características da litologia e da geoestrutura da rocha baseada nos seguintes tópicos:

- Origem do tipo de rocha (litologia) – ígnea, metamórfica ou sedimentar;
- Estado da geoestrutura – maciça ou ligeira, moderadamente a intensamente fraturada/dobrada;
- Resistência da rocha – compacta, branda ou decomposta.

B – relacionado com a geometria, i.e., refere-se ao efeito do padrão da descontinuidade no que diz respeito à origem do túnel, com base:

- Espaçamento entre as descontinuidades;
- Atitude das descontinuidades;
- Sentido da escavação subterrânea.

C – relacionamento com a hidrogeologia, i.e., refere-se com o efeito do fluxo de água subterrânea e/ou superficial relativamente às características das descontinuidades, com base:

- Caudal efluente à escavação;
- Características geotécnicas das descontinuidades (boa, razoável ou fraca);
- Análise de conjunto do maciço com base no somatório dos parâmetros A e B.

O Quadro 13 ilustra os parâmetros usados para a classificação RSR e a Figura 20 o ábaco para definir o sustimento.

Quadro 13. Classificação RSR – *Rock Structure Rating* (adaptado de Wickham et al. 1972, 1974).

Parâmetro A : Geologia: tipo de rocha e estrutura geológica								
	Tipo de Rocha (Grau de alteração)				Estrutura Geológica			
	Compacta (W1-2)	Intermédia (W3)	Alterada (W4)	Decompota (W5)	Compacta e maciça	Ligeiramente deformada	Moderadamente deformada	Intensamente deformada
Ígnea	1	2	3	4				
Metamórfica	1	2	3	4				
Sedimentar	2	3	4	4				
Tipo 1					30	22	15	9
Tipo 2					27	20	13	8
Tipo 3					24	18	12	7
Tipo 4					19	15	10	6

Parâmetro B: Padrão da fracturação e sentido da escavação									
Espaçamento médio das descontinuidades	Perpendicular à escavação					Paralelo à escavação			
	Avanço da escavação					Avanço da escavação			
	Inclinação das principais descontinuidades ^a					Inclinação das principais descontinuidades			
	Ambas		A favor do pendor		Contra o pendor	Qualquer direção			
	(sub) Horizontal	Inclinada	(sub) Vertical	Inclinada	(sub) Vertical	(sub) Horizontal	Inclinada	(sub) Vertical	
1. Extremamente fraturado (F5) < 6 cm		9	11	13	10	12	9	9	7
2. Muito fraturado (F4) 6 - 20 cm		13	16	29	15	17	14	14	11
3. Moderadamente fraturado (F3A) 20 - 30 cm		23	24	28	19	22	23	23	19
4. Algo fraturado ou compartimentado (F3B) 30 - 60 cm		30	32	36	25	28	30	28	24
5. Compartimentado a compacto (F2) 60 - 120 cm		36	38	40	33	35	36	24	28
6. Compacto (F1) > 120 cm		40	43	45	37	40	40	38	34

^aMergulho:

(sub) Horizontal: 0-20°;

Inclinada: 20-50°; (sub) Vertical: 50-90°

(sub) Vertical: 50-90°

Parâmetro C: Água subterrânea e condições geotécnicas das descontinuidades						
Fluxo de água 225 (L/min) / 300 m de túnel	Soma dos parâmetros A+B					
	13-44			45-75		
	Condições das descontinuidades ^b					
	Bom	Razoável	Fraco	Bom	Razoável	Fraco
Nenhum	22	18	12	25	22	18
Ligeiro, < 750 L/min	19	15	9	23	19	14
Moderado, 750 - 3800 L/min	15	22	7	21	16	12
Intenso, >3800 L/min	10	8	6	18	14	10

^b Condições das descontinuidades:

boa = apertada ou com preenchimento;

razoável = ligeiramente alterada ou alterada;

fraca = muito alterada, alterada ou aberta

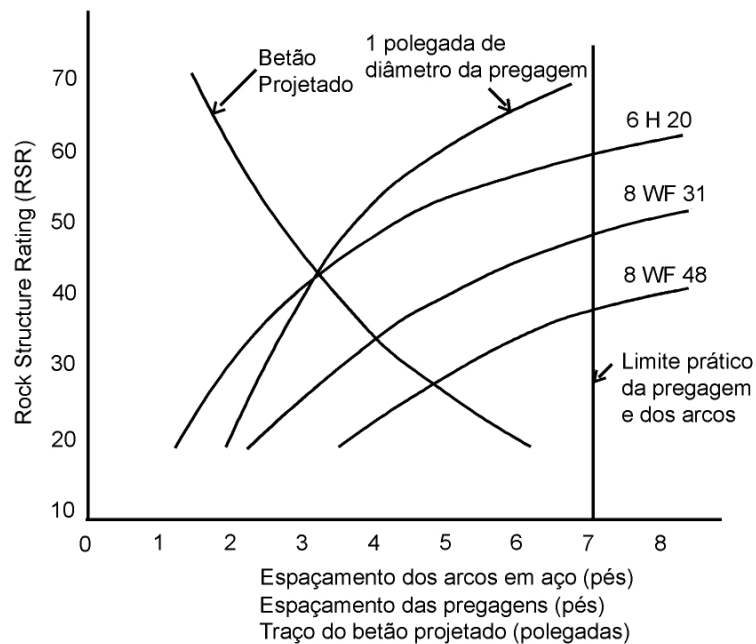


Figura 20. Ábaco da classificação RSR – *Rock Structure Rating* para a definição do sustimento segundo Wickham et al. (1972, 1974). In: Hoek (2007).

2.6.4. RMR – *Rock Mass Rating*

A classificação de maciços rochosos *Rock Mass Rating* (RMR), também conhecida como classificação geomecânica foi criada e desenvolvida por Bieniawski (1973, 1976, 1979, 1989, 1993). A classificação enunciada foi na sua essência desenvolvida por Bieniawski (1973, 1976, 1979) na década de 70 do século passado, utilizando dados obtidos em escavações realizadas em rochas da África do Sul (Brady & Brown 2004). Em 1989, a classificação geomecânica RMR desenvolveu-se com base em cerca de 350 casos de estudo, beneficiando assim de ajustes e propostas de modificações por parte de vários investigadores e geo-profissionais, refinando-a e adaptando-a a diversas aplicações de engenharia (Bieniawski 1989, Vardakos 2004). O trabalho de Serafim & Pereira (1983) foi uma importante achega para a aplicação no RMR das condições geohidráulicas dos maciços e o cálculo do módulo de deformabilidade.

Esta classificação é internacionalmente conhecida pela sua versatilidade na prática da engenharia para o dimensionamento de escavações subterrâneas, de cavernas, de túneis mineiros e de estabilidade de taludes. Esta classificação deve ser usada como um complemento ao dimensionamento (*design*) do suporte e não como uma resposta aos diversos problemas que possam vir a surgir no projecto de uma obra de engenharia.

A RMR baseia-se na consideração de seis parâmetros geológico-geotécnicos (Figura 21), a quais são atribuídos pesos. Os seguintes seis parâmetros são usados para classificar o maciço rochoso:

- P1: Resistência do material-rocha (índices de carga pontual - PLT e/ou de compressão uniaxial - UCS);
- P2: Índice de qualidade de rocha – *Rock Quality Designation* (RQD);
- P3: Espaçamento entre descontinuidades;
- P4: Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades;
- P5: Condições de percolação de água;
- P6: Correção da orientação das descontinuidades relativamente ao sentido de escavação.

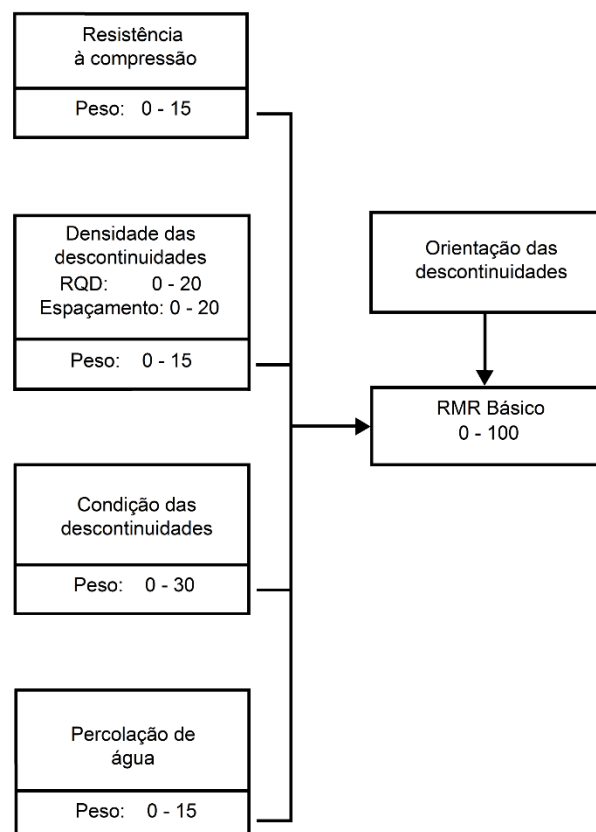


Figura 21. Representação gráfica da obtenção do valor de RMR (adaptado de Bieniawski 1973).

De acordo com o valor de RMR, é possível classificar o maciço quanto à sua qualidade geomecânica avaliando os seus parâmetros de resistência, estimar o seu módulo de deformabilidade e analisar o sustimento necessário para suportar a escavação. Quanto maior for o índice, melhores serão, à partida, as condições do maciço rochoso. A partir do valor obtido para o RMR, o maciço rochoso é então enquadrado numa de cinco classes, para as quais estão

estabelecidos os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb (coesão e ângulo de atrito), período de tempo sem suporte (*stand-up-time*) e informações genéricas sobre a qualidade do maciço (Bieniawski 1989).

P1: Resistência mecânica

A avaliação da resistência deve ser obtida, preferencialmente, a partir de sondagens com recuperação de testemunhos de material-rocha, de acordo com as condições do local, recorrendo ao índice de carga pontual ou, alternativamente, ao índice de resistência de compressão uniaxial através de execução de ensaios esclerométricos no material rochoso. No Quadro 14 apresenta-se a descrição e os pesos deste parâmetro.

Quadro 14. Descrição e pesos atribuídos à resistência para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).

Descrição	Resistência à compressão uniaxial (σ_c), UCS (MPa)	Resistência à carga pontual, (IS_{50}) PLT (MPa)	Pesos
Excepcionalmente resistente	>250	8	15
Muito resistente	100-250	4-8	12
Medianamente resistente	50-100	2-4	7
Resistente	25-50	1-2	4
Pouco resistente	10-25		2
Muito pouco resistente	2-10	<i>Para esta gama baixa de valores, é preferível/aconselhável o recurso ao ensaio de compressão uniaxial.</i>	1
Muitíssimo pouco resistente	1-2		0

P2: Índice de qualidade da rocha (RQD)

Na determinação do índice de qualidade da rocha recorre-se ao RQD – *Rock Quality Designation* (Deere et al. 1967, Deere & Deere 1988) que é, em regra, determinado a partir da avaliação de sondagens com recuperação de rocha. Os pesos correspondentes aos valores de RQD são os que se apresentam no Quadro 15. A Figura 22 apresenta um gráfico, comumente, usado para a determinação do RQD_t em função do espaçamento médio das descontinuidades, sendo também conhecido pelo ábaco de Priest & Hudson (1976).

Quadro 15. Descrição e pesos atribuídos ao RQD para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski 1989).

Descrição	RQD (%)	Pesos
Excelente	90-100	20
Boa	75-90	17
Razoável	50-75	13
Fraca	25-50	8
Muito fraca	< 25	3

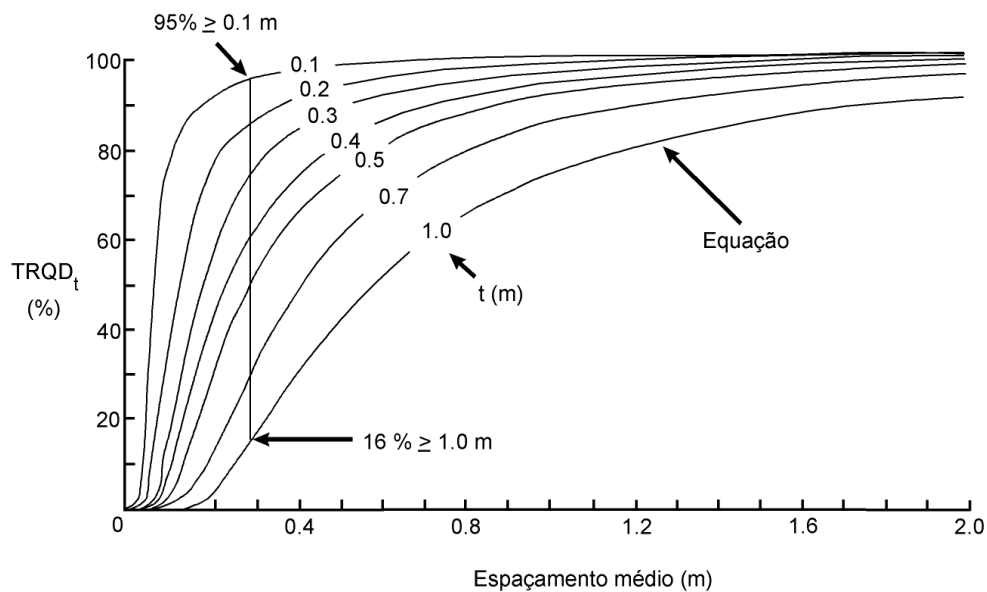


Figura 22. Ábaco para a determinação da variação do RQD com o espaçamento médio das descontinuidades, através do RQD teórico (RQDt) para uma série de intervalos do valor limiar t ($TRQD_t$ – *theoretical RQD for a general threshold value t*), adaptado de Priest & Hudson (1976) e de Priest (1993).

P3: Espaçamento entre as descontinuidades

A distância entre duas descontinuidades adjacentes deve ser medida para a rede de descontinuidades baseada numa amostragem linear (considerar na análise, o espaçamento médio das famílias de descontinuidades e o *fracture intercept*, i.e., o espaçamento médio independentemente das famílias; ISRM 1981) e o peso a considerar na classificação RMR deve corresponder ao espaçamento mais determinante. No Quadro 16 apresentam-se os pesos relativos a este parâmetro.

Quadro 16. Descrição e pesos atribuídos ao espaçamento das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski 1989).

Descrição	Espaçamento (m)	Pesos
Muito afastado	>2	20
Moderadamente afastado	0,6-2	15
Afastado	0,2-0,6	10
Próximo	0,06-0,2	8
Muito próximo	<0,06	5

P4: Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades

Este parâmetro inclui na sua classificação a continuidade, a abertura, a rugosidade, o preenchimento e o grau de alteração das paredes das descontinuidades. Para aquisição dever-se-á seguir as recomendações propostas pela ISRM (1978, 1981). Os pesos relativos a este parâmetro apresentam-se no Quadro 17. Para apoiar a descrição das condições das descontinuidades Bieniawski (1989) propôs algumas orientações sintetizadas no Quadro 18

Quadro 17. Descrição e pesos atribuídos às condições geológico-geotécnicas das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski 1989).

Descrição	Pesos
Superfícies muito rugosas, pouco contínuas, fechadas e não alteradas.	30
Superfícies ligeiramente rugosas, com aberturas <1mm e ligeiramente alteradas.	25
Superfícies ligeiramente rugosas, com aberturas <1mm e muito alteradas.	20
Superfícies lisas ou com preenchimento <5mm ou com aberturas entre 1-5 mm, contínuas.	10
Superfícies com enchimento mole com espessuras > 5mm ou aberturas > 5mm, contínuas.	0

Quadro 18. Descrição e pesos atribuídos às condições das descontinuidades para a classificação RMR
(adaptado de Bieniawski, 1989).

Comprimento (continuidade)	< 1m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Pesos	6	4	2	1	0
Abertura	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Pesos	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Ligeiramente rugosa	Lisa	Estriada
Pesos	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Enchimento duro < 5 mm	Enchimento duro > 5 mm	Enchimento mole < 5 mm	Enchimento mole > 5 mm
Pesos	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alterada	Ligeiramente alterada	Moderadamente alterada	Muito alterada	Decomposta
Pesos	6	5	3	1	0

P5: Condições de percolação de água

Em escavações subterrâneas (ou túneis mineiros) deve ser determinado o fluxo de água em litros/minuto, por cada 10 m de extensão; noutros casos pode ser considerado a partir duma denominação geral, tal como seco, húmido, etc. (CFCFF 1996). No Quadro 19 apresentam-se os pesos relativos a este parâmetro.

Quadro 19. Descrição e pesos atribuídos às condições de percolação de água para a classificação RMR
(adaptado de Bieniawski 1989).

Fluxo de água por cada 10 m de extensão (L/min)	Nenhum	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125
Pressão de água nas descontinuidades/tensão principal máxima	0	0 - 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5
Descrição geral	Seco	Algo Húmido	Húmido	Gotejante	Fluxo
Pesos	15	10	7	4	0

P6: Orientação das descontinuidades

A influência da orientação das descontinuidades é considerada relativamente ao sentido do túnel, e quanto ao declive face ao alinhamento da escavação. Como podem existir várias famílias de descontinuidades, a família dominante será o principal alvo desta classificação, mas ter-se-á que fazer uma análise geológico-estrutural global dos restantes sistemas de descontinuidades para a ponderação final na correção deste parâmetro. No Quadro 20 apresenta-se a descrição deste parâmetro e no Quadro 21, os pesos correspondentes para três situações: túneis/minas, fundações e taludes.

Quadro 20. Descrição da orientação das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski 1989).

Direção perpendicular ao eixo do túnel	
Inclinação 45°-90°, a favor da escavação	Inclinação 20°-45°, a favor da escavação
Muito favorável	Favorável
Inclinação, 45°-90° contra a escavação	Inclinação, 20°-45° contra a escavação
Razoável	Desfavorável
Direção paralela do eixo do túnel	
Inclinação 45°-90°	Inclinação 20°-45°
Muito desfavorável	Favorável
Inclinação 0-20°, independente da direção	
Favorável	

Quadro 21. Pesos atribuídos à orientação das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski 1989).

Orientação das descontinuidades	Muito favorável	Favorável	Medianamente favorável	Desfavorável	Muito desfavorável
Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
Fundações	0	-2	-7	-15	-25
Taludes	0	-5	-25	-50	-60

O valor final do índice RMR resulta do somatório dos pesos parciais (P1 a P5 + P6) anteriormente apresentados, traduzido na expressão [5]:

$$\text{RMR} = \sum (\text{parâmetros classificativos}) + \text{ajuste da orientação das descontinuidades} \quad [5]$$

O resultado obtido após a aplicação da expressão anterior permite associar uma classe ao maciço em estudo de acordo com os Quadro 22 e Quadro 23, e concluir os procedimentos a sugerir para o dimensionamento da obra de engenharia.

Quadro 22. Parâmetros de projeto e propriedades do maciço rochoso (adaptado de Bieniawski 1993).

Parâmetros/Propriedades do maciço rochoso	RMR (classes)				
	100-81 (I)	80-61 (II)	60-41 (III)	40-21 (IV)	< 20 (V)
Classificação do maciço rochoso	Muito bom	Bom	Razoável	Fraco	Muito fraco
Tempo médio sem sustimento	20 anos para 15 m de vão livre	1 ano para 10 m de vão livre	1 semana para 5 m de vão livre	10 horas para 2,5 m de vão livre	30 minutos para 1 m de vão livre
Coesão do maciço rochoso, (MPa)*	> 0,4	0,3-0,4	0,2-0,3	0,1-0,2	< 0,1
Ângulo de atrito interno 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 (°), (Walthman 2002)	> 70	65	55	45	< 40

**Estes valores aplicam-se apenas a taludes em maciços rochosos saturados e alterados*

Quadro 23. Classes do maciço rochoso determinado através da soma dos pesos parciais e tipos de escavação e sugestão das condições de suporte associados (adaptado de Bieniawski 1989).

Classes	Escavação	Suporte		
		Pregagens (20 mm diâmetro envolvidas em betão)	Betão projetado	Cimbres
RMR 81-100 Classe I Muito bom	Seção total, 3 m de avanço.	Geralmente não requer suporte, com exceção de pregagens ocasionais.		
RMR 61-80 Classe II Bom	Seção total, 1.0 a 1.5 m de avanço. Suporte completo a 20 m da frente.	Pregagens de 3 m de comprimento, espaçadas 2.5 m, ocasionalmente com malha de aço em certas zonas do teto.	50 mm no teto quando necessário.	Nenhum.
RMR 41-60 Classe III Razoável	Seção parcial (frente e baixo), avanço 1.5-3 m. Início do suporte após cada desmonte. Suporte completo a 10m.	Pregagens sistemáticas com 4 m de comprimento, espaçadas de 2 m nos hasteais e teto, com malha de aço no teto.	50-100 mm no teto; 30 mm nos hasteais.	Nenhum.
RMR 21-40 Classe IV Fraco	Seção parcial (frente e baixo), avanço 1.0-1.5 m. Instalação do suporte concomitantemente com a escavação.	Pregagens sistemáticas com 4-5 m de comprimento, espaçadas de 1.0-1.5 m com malha de aço no teto e hasteais.	100-150 mm no teto; 100 mm nos hasteais.	Cimbres leves a médios espaçados de 1.5 m.
RMR < 20 Classe V Muito fraco	Seções múltiplas, avanço de 0.5-1.5 m. Instalação do suporte com a escavação. Betão projetado logo após o desmonte.	Pregagens sistemáticas com 5-6 m de comprimento, espaçadas de 1.0-1.5 m com malha de aço no teto e hasteais. Pregagem na soleira.	150-200 mm no teto; 150 mm nos hasteais; 50 mm na soleira.	Cimbres médios e pesados espaçados de 0.75 m. Fecho da soleira.

Elaboraram-se adaptações desta classificação para outros fins (por exemplo, para a classificação SMR, DMR, etc.), casos esses que não serão tratados neste documento visto não se enquadrarem no objetivo desta tese.

Existem ainda propostas de correlações entre o valor do RMR e o módulo de deformabilidade (E_M) do maciço rochoso. Nicholson & Bieniawski (1990) desenvolveram uma expressão empírica [6] para correlacionar o fator de redução do módulo de deformabilidade da rocha intacta (MRF) com o valor do RMR.

$$MRF = \frac{E_M}{E_r} = 0.0028 \times RMR^2 + 0.9 \times e^{\left(\frac{RMR}{22.28}\right)} \quad [6]$$

Em que:

E_M – módulo de deformabilidade do maciço rochoso

E_R – módulo de deformabilidade da rocha intacta

São ainda de referir as correlações apresentadas por (Figura 23):

- Serafim & Pereira (1983):

$$E_M(\text{GPa}) = 10^{\frac{\text{RMR}-10}{40}} \quad [7]$$

- Bieniawski (1989):

$$E_M(\text{GPa}) = 2 \times \text{RMR} - 10; \text{RMR} > 50 \text{ e } \sigma_c > 100\text{MPa} \quad [8]$$

- Hoek & Brown (1997)

$$E_M(\text{GPa}) = \frac{\sqrt{\sigma_c}}{10} \times 10^{(\text{RMR}-\frac{10}{40})}; \sigma_c \leq 100\text{MPa} \quad [9]$$

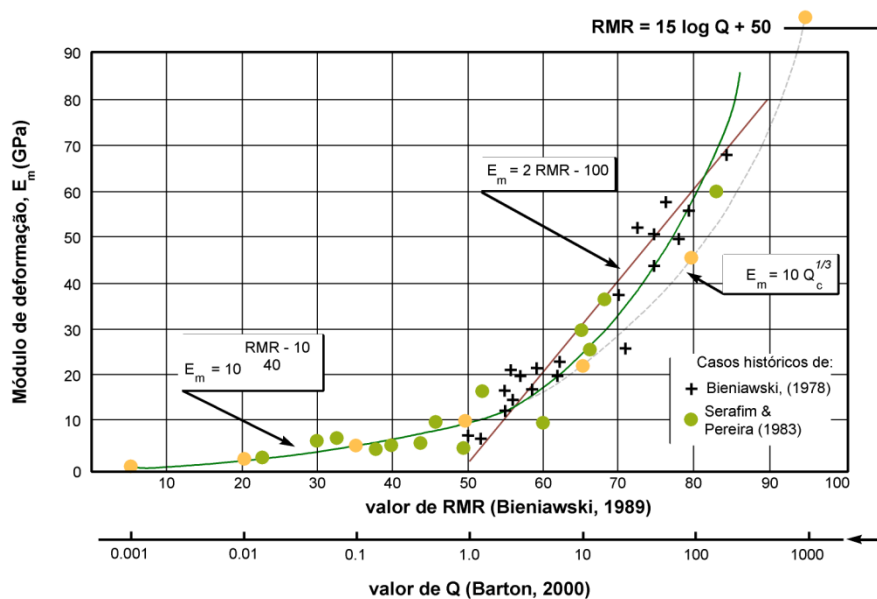


Figura 23. Módulo de deformabilidade (E_M) versus valores de RMR e de Q (adaptado de Barton & Bieniawski 2008).

O tempo médio de auto-suporte para túneis com teto em arco, pode ser obtido através do ábaco de Bieniawski (1989), Figura 24, Lauffer (1988) observou que o tempo de auto-suporte aumenta em túneis escavados com recurso à tuneladora TBM. Este aumento pode ser tido em consideração, aumentando uma classe ao resultado final do RMR.

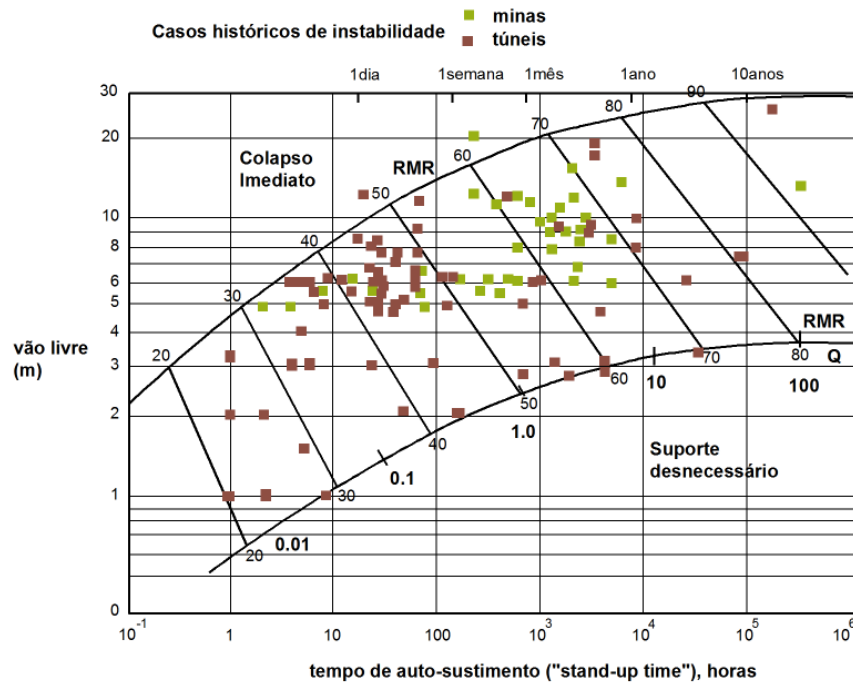


Figura 24. Ábaco do tempo de auto-suporte (horas) versus RMR, baseado em casos históricos segundo Bieniawski (1989). A conversão de RMR em Q segundo Barton (2000), (adaptado de Barton & Bieniawski 2008).

2.6.5. SRC - Surface Rock Classification

A classificação geomecânica SRC – *Surface Rock Classification* de González de Vallejo (1983, 2003) baseia-se na classificação RMR diferenciando-se por considerar o estado de tensão do maciço rochoso, das condições construtivas do túnel, do estudo geotectónico dos afloramentos rochosos e dos constrangimentos tectonossísmicos regionais da área em estudo (Quadro 24).

Os parâmetros que intervêm nesta classificação são os seguintes (González de Vallejo 2003, González de Vallejo & Ferrer 2011):

- Resistência mecânica;
- Espaçamento das descontinuidades / Grau de fraturação (RQD);
- Condições geotécnicas e geológicas das descontinuidades;
- Infiltrações de água;
- Estado de tensão.

O estado da tensão é definido pelos seguintes fatores:

- Fator de competência:

$$F_c = \frac{\sigma_{cl}}{\sigma_v} \quad [10]$$

Onde:

σ_{cl} – resistência da matriz rochosa;

σ_v – tensão efetiva máxima vertical.

São então verificadas três condições de estabilidade:

- $F_c > 10$: a matriz rochosa tem uma resistência muito superior às tensões do maciço e a escavação é estável;
- $10 > F_c > 2$: a estabilidade está condicionada pelo tempo e pelas propriedades da rocha podendo estabelecer três tipos de deformações: elástica, dúctil e rotura frágil;
- $F_c < 2$: a escavação pode ser instável.
- Estrutura tectónica regional (quando estão presentes em áreas de falhas regionais e o quadro sismotectónico);
- Fator de relaxamento das tensões (quociente entre a idade, em anos $\times 10^{-3}$) do último evento orogénico regional que terá afetado a região e a máxima espessura de recobrimento;
- Atividade sísmica (quando a zona é de sismicidade elevada).

Quadro 24. Classificação geomecânica SRC (adaptado de González de Vallejo 2003).

Índices de qualidade da rocha	Intervalos de valores						
(1) Resistência da rocha							
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 slickensides	Superfícies lisas ou com slickensides		
	Descontínuas	Descontínuas	Descontínuas	Contínuas	Contínuas		
	Fechadas	Aberta, < 1mm	Abertas, = 1mm	Abertas, 1 a 5 mm	Abertas, > 5mm		
	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 por cada 10 m de comprimento 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 b) Tectónica/Estrutura	>10	10-5	5-3	< 3			
	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") c)	>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		

a) Segundo González de Vallejo (1985)

b) Compressão uniaxial da rocha intacta / tensão vertical

c) Razão entre a idade da última deformação orogénica que afectou o maciço rochoso (em anos x 10³) e o máximo de espessura de recobrimento (em metros)

2.6.6. M-RMR – Mining Rock Mass Rating

De acordo com Milne et al. (1998), uma das principais diferenças no dimensionamento de túneis mineiros relaciona-se com a abordagem da aplicação das classificações geomecânicas. Nos túneis, as condições de tensão (*stress*) em profundidade são, geralmente, consideradas constantes ao longo de extensões significativas, mesmo que a orientação da escavação subterrânea seja diversa (Brady & Brown 2004).

Para facilitar o desenvolvimento de um sistema de classificação de maciços rochosos para apoiar as escavações subterrâneas, especificamente para a abertura de galerias mineiras, Laubscher (1975) defendeu que o RMR de Bieniawski (1973, 1976, 1979) seria uma classificação muito pouco flexível para as aplicações mineiras. De forma a tornar o sistema de classificação mais aplicável ao ambiente mineiro, Laubscher (1975) e Laubscher & Taylor (1976) desenvolveram ajustes ao RMR para a aplicação de diferentes aplicações mineiras. Estes ajustes incluíam avaliações geotécnicas *in situ*, derivados do sistema de classificação RMR (Laubscher & Jakubec 2000). A resultante destes ajustes deu origem ao *Modified Rock Mass Rating System*.

Como os restantes sistemas de classificações, as modificações foram feitas para valores de classificação com base na experiência adquirida com a aplicação prática e como a importância relativa dos respetivos ajustes, tornou-se aparente. Estas modificações levaram ao desenvolvimento do sistema *Mining Rock Mass Rating* (M-RMR) completamente independente do definido inicialmente por Laubscher (1975). A aplicação de M-RMR envolve a atribuição de pesos ao maciço rochoso com base nos parâmetros geológicos-geotécnicos mensuráveis (Laubscher 1990). Os parâmetros geológicos são atribuídos de acordo com a sua importância relativa, com um peso máximo de 100. Os pesos de valores entre 0 e 100, cobrem cinco classes de maciços rochosos com pesos de 20 por classe, variando de muito fraco para muito bom, que são uma reflexo da resistência mecânica relativa da massa rochosa (Laubscher 1990).

Cada classe do maciço rochoso são ainda subdivididos numa divisão de A e B. Os parâmetros geológicos-geotécnicos avaliados são os seguintes:

- Resistência mecânica à compressão da rocha intacta (*Intact Rock Strength* – IRS, ou “Deformação da Rocha Intacta”);
- Espaçamento das descontinuidades (grau de fracturação);
- Condições geotécnicas das descontinuidades e a presença de água.

Intact Rock Strength (IRS)

O *Intact Rock Strength* refere-se à resistência à compressão uniaxial (UCS – *Uniaxial Compressive Strength*) da rocha intacta das superfícies das descontinuidades. As zonas que são intercaladas de rocha dura e de rocha branda podem afetar o IRS do maciço rochoso, podendo ser usado como base um valor médio de resistência mecânica, mas esse valor terá maior influência em rochas brandas do que em rochas de boa qualidade (Laubscher 1990).

Para estes casos, foi desenvolvido por Laubscher (1990), um ábaco empírico de correlação não-linear para determinar o valor do IRS nos casos do maciço rochoso heterogêneo contendo zonas intercaladas de material rochoso duro e brando (Figura 25).

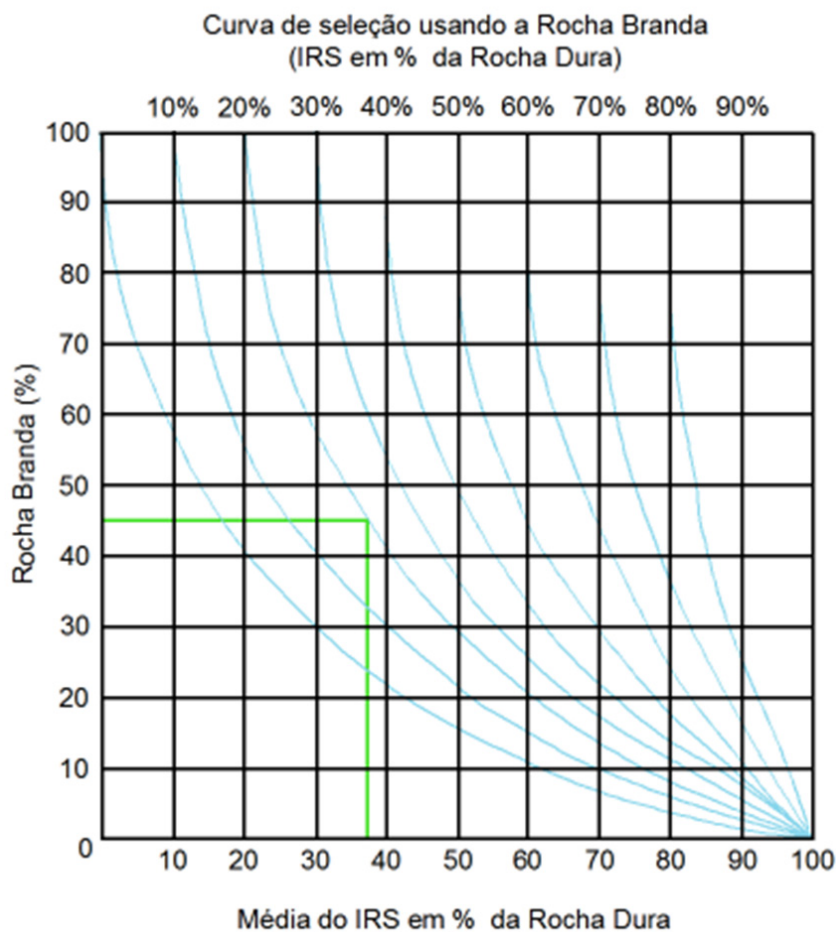


Figura 25. Ábaco da curva de seleção da rocha branda vs. IRS, em %, de rocha dura (adaptado de Laubscher 1990).

O IRS será determinado com valores entre 0 e 20, intercalado de valores para tensões *in situ* de 0 a 185 MPa, sendo este último o valor máximo usado, em que tensões superiores a 185 MPa têm um impacto insignificante na resistência do maciço rochoso fracturado (Laubscher 1990).

Espaçamento das descontinuidades

O espaçamento das descontinuidades é avaliado pela análise de todas as descontinuidades, excluindo as descontinuidades com preenchimento ou efchadas, uma vez que estas são avaliadas separadamente na determinação do *IRS*.

Sabendo que, em regra, o bloco-unitário do grau de fraturação de um dado maciço rochoso é definido por três famílias de descontinuidades principais e com descontinuidades aleatórias que necessariamente modificam a forma do bloco; assim, segundo Laubscher (1990) apenas as três famílias de descontinuidades principais são consideradas nesta classificação. O valor para uma, duas ou três famílias de descontinuidades pode ser retirado do ábaco da Figura 26.

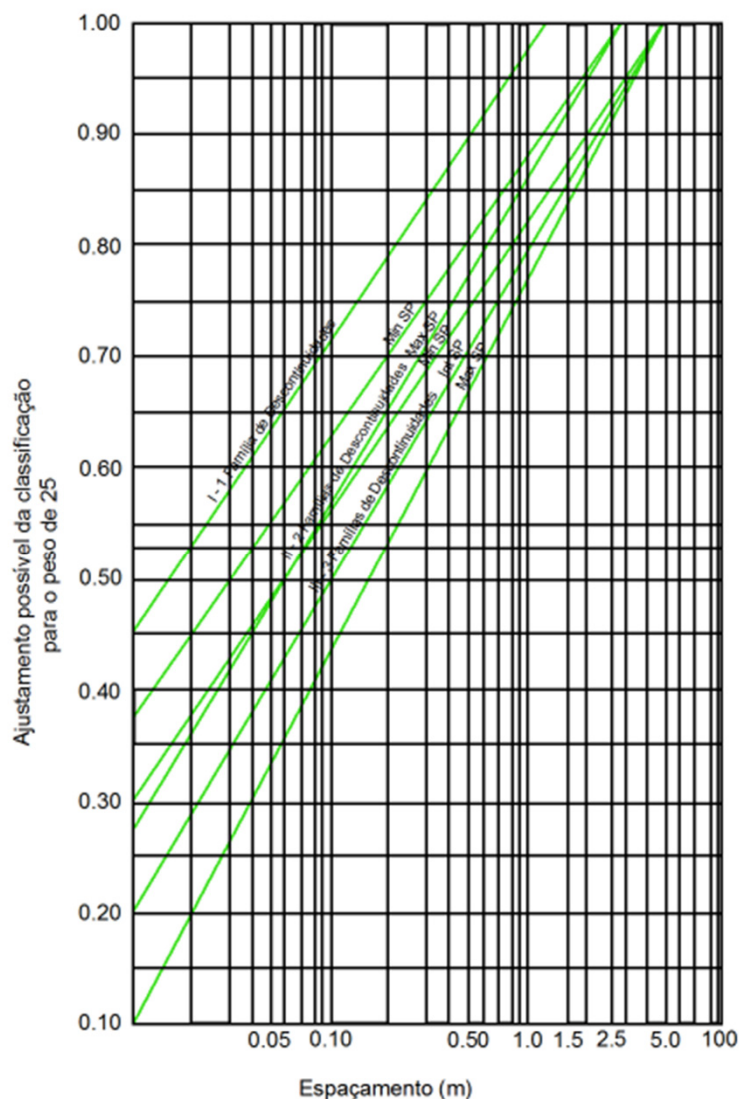


Figura 26. Ábaco do ajustamento do espaçamento (adaptado de Laubscher 1990).

O espaçamento entre as descontinuidades pode ser avaliado segundo duas abordagens distintas (Laubscher 1990):

- Medição separada do RQD e do espaçamento das descontinuidades (J_s), estes parâmetros têm pesos máximos entre 15 e 20 respetivamente. O RQD deve ser calculado em carotes com diâmetro nunca inferior a 42 mm. Para calcular o RQD, o comprimento mínimo do testemunho terá de ser de 100 mm. Se a perfuração for perpendicular às descontinuidades com espaçamento de 90 mm, o valor do RQD será de zero. No entanto, se o furo tiver uma inclinação de 40° , o espaçamento das descontinuidades será de 137 mm, o que equivale a um RQD de 100%. Se apenas for considerado um comprimento de testemunho de 100 mm ou mais, o testemunho seria apenas de 91 mm com um ângulo de perfuração de 40° , o que equivale a um RQD de zero;
- Medição de todas as descontinuidades para facilitar a determinação da frequência de fracturação por metro com um peso máximo de 40. A definição dos sistemas de descontinuidade mais comuns, ou seja, uma, duas ou três famílias de descontinuidades tem que ser estabelecido para a mesma frequência de fracturação. Uma família de descontinuidades tem mais resistência que duas famílias de descontinuidades e que três famílias de descontinuidades. A frequência da fracturação não deve reconhecer o grau de recuperação do testemunho, consequentemente, a frequência da fracturação por metro, deve ser aumentada para refletir qualquer perda do testemunho. Para ajustar esse valor, divide-se a frequência de fracturação por metro de recuperação, multiplicando o quociente por 100.

Condições geotécnicas das descontinuidades

As condições das descontinuidades é uma avaliação comum das propriedades geológico-geotécnicas das suas superfícies em termos de rugosidade, do grau de alteração/alterabilidade, do tipo de preenchimento e da presença de água. O rácio máximo que se poderá obter neste parâmetro é de 40. No Quadro 25 poder-se-á observar os valores atribuídos aos parâmetros anteriores com os respetivos pesos. Os parâmetros são apresentados de A a D, o parâmetro A representa a expressão das descontinuidades em larga escala enquanto o parâmetro B representa a expressão das descontinuidades numa escala mais reduzida (Figura 27).

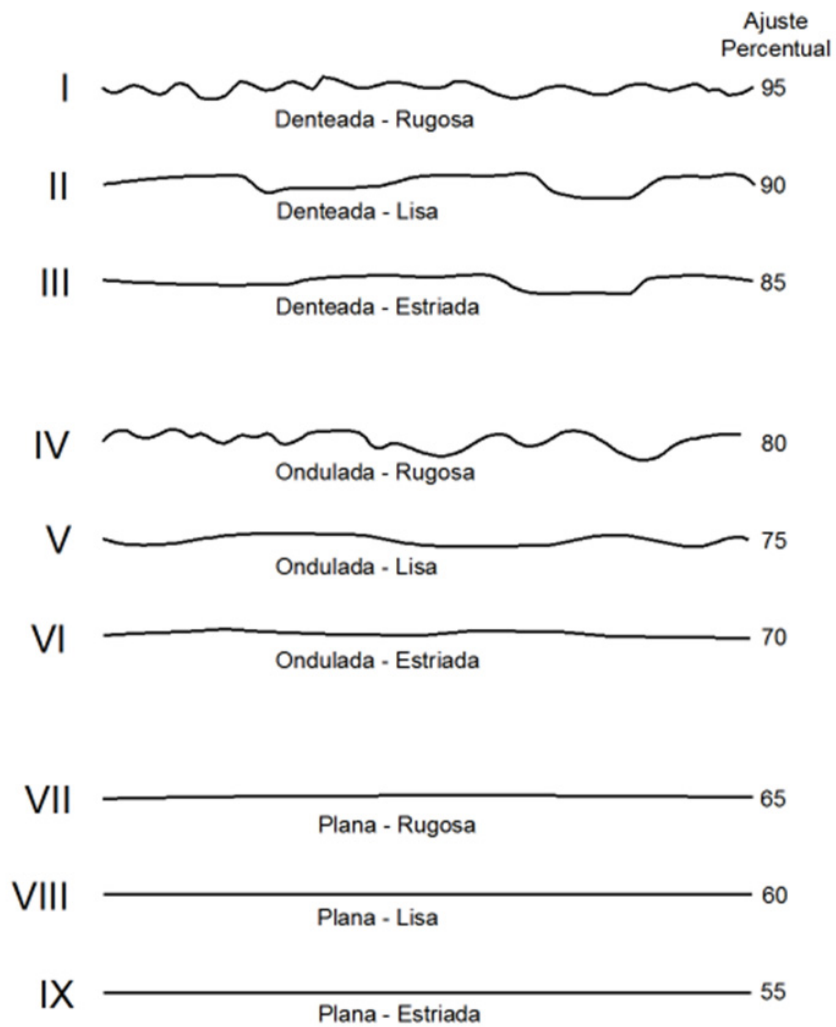


Figura 27. Esquemas de rugosidade das superfícies de descontinuidades (adaptado de Laubscher 1990).

O parâmetro C representa a alterabilidade nas paredes das descontinuidades, enquanto o parâmetro D representa o preenchimento das descontinuidades. Para cada condição das diferentes descontinuidades o valor usado é calculado através de uma média ponderada.

Quadro 25. Condições geotécnicas das discontinuidades e o efeito da presença de água (adaptado de Laubscher 1990).

% de ajuste cumulativo para um peso de 40					
Parâmetro	Descrição	Seco	Húmido	Ajuste (%)	
				Pressão Moderada (25 - 125 L/m)	Pressão Elevada (> 125 L/m)
A) Larga expressão das discontinuidades	Muito curvas ou onduladas	100	100	95	90
	Curvas	95	90	85	80
	Medianamente curvas	85	80	75	70
	Ligeiramente onduladas	80	75	70	65
	Planas	75	70	65	60
B) Pequena expressão das discontinuidades	Rugosas denteadas/irregulares	95	90	85	80
	Suaves denteadas	90	85	80	75
	Rugosas onduladas	85	80	75	70
	Estriadas denteadas	80	75	70	65
	Onduladas suaves	75	70	65	60
	Estriadas onduladas	70	65	60	55
	Planares rugosas	65	60	55	50
	Planares suaves	60	55	50	45
Polidas	55	50	45	40	
C) A alteração da parede da discontinuidade mais branda que a da rocha e se apenas é mais fraca que o preenchimento		75	70	65	60
D) Preenchimento das discontinuidades	Material endurecido e cisalhado	90	85	80	75
	- grosseira				
	Média				
	Fina	80	75	70	65
	Material endurecido e cisalhado	70	65	60	55
	- grosseira				
	Média				
	Fina	60	55	50	45
	Es grossura de alteração	45	40	35	30
	< amplitude de rugosidade				
Es grossura de alteração	30	20	25	10	
> amplitude de rugosidade					

De forma a avaliar o efeito da escavação mineira no maciço rochoso, os pesos da classificação do RMR básico são ajustados tendo em conta quatro fatores para determinar o valor do RMR ajustado, ou seja o valor do M-RMR. Estes ajustes percentuais são de aproximação empírica e baseados em numerosas observações de campo (Laubscher 1990). As atividades mineiras a serem consideradas incluem:

- Grau de alteração;
- Tensões induzidas durante a mineração;
- Orientação das discontinuidades;
- Efeito do desmonte.

Grau de alteração

A suscetibilidade de certos tipos de rocha à rápida alteração (ou alterabilidade; Aires-Barros 1991) necessita de ser considerado. De acordo com Laubscher (1990), o grau de alteração afeta os três parâmetros do RMR (IRS, RQD ou a frequência de fracturação por metro e as condições das descontinuidades). Por outro lado o grau de alteração químico pode diminuir significativamente a resistência da rocha, aumentando a fracturação que resultará numa diminuição do RQD enquanto que o da rocha encaixante ou material esmagado afeta as condições das descontinuidades.

O grau de alteração é aplicado durante um período de seis meses a quatro anos. Os ajustes do grau de alteração estão presentes no Quadro 26.

Quadro 26. Grau de alteração na classificação M-RMR (adaptado de Jakubec & Laubscher 2000).

Descrição	Grau de alteração potencial e % dos ajustes				
	6 meses	1 ano	2 anos	3 anos	4 anos
São (W1)	100	100	100	100	100
Pouco alterado (W2)	88	90	92	94	96
Medianamente alterado (W3)	82	84	86	88	90
Muito alterado (W4)	70	72	74	76	78
Decomposto (W5)	54	56	58	60	62
Solo Residual (W6)	30	32	34	36	38

Tensões induzidas durante a mineração

A reorganização do campo de tensão regional devido às atividades mineiras, resulta em tensões induzidas na mineração. Os ajustes na tensão (*stress*) refletem-se na magnitude e na orientação da tensão principal (Jakubec & Laubscher 2000). Esses ajustes devem ser da ordem dos 60% a 120% mediante condições de confinamento mau e bom, respetivamente (Figura 28).

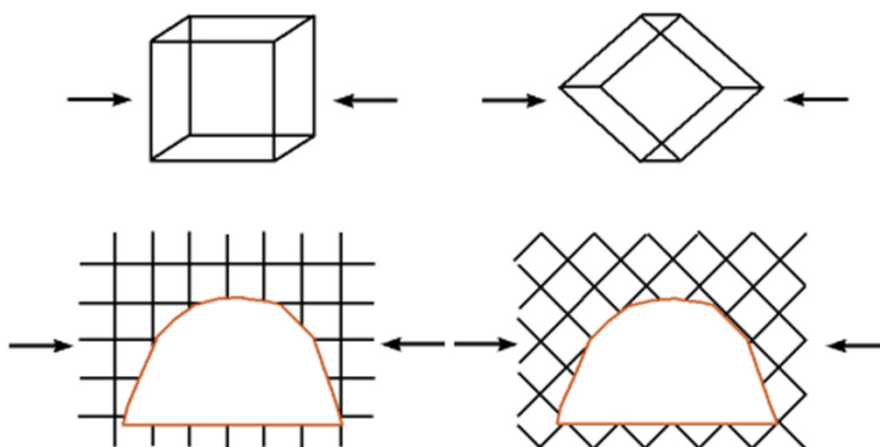


Figura 28. Ilustração esquemática dos ajustamentos para as tensões induzidas (Jakubec & Laubscher 2000).

Orientação das descontinuidades

De acordo com Laubscher (1990), o comportamento do maciço rochoso dar-se-á em função do tamanho, forma e orientação da escavação. Fora isso, a estabilidade da escavação é significativamente afetada pela atitude das descontinuidades e se caso as bases dos blocos formados pelas descontinuidades estão expostas (Figura 29). As percentagens de ajuste aplicáveis à orientação das descontinuidades estão presentes no Quadro 27.

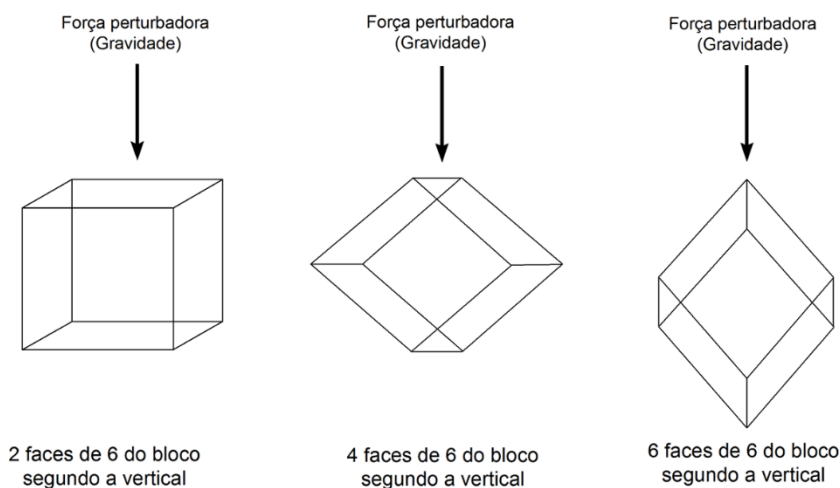


Figura 29. Esquema da orientação das descontinuidades em função das tensões sujeitas que ditará o comportamento do maciço rochoso (adaptado de Laubscher 1990).

Quadro 27. Percentagens de ajuste aplicáveis à orientação das descontinuidades (adaptado de Laubscher 1990).

Nº de descontinuidades que definem o bloco	Nº de faces inclinadas				
	70%	75%	80%	85%	90%
3	3		2		
4	4	3		2	
5	5	4	3	2	1
6	6	5	4	3	2,1

Efeitos do desmonte

O desmonte criará novas descontinuidades (“fraturas induzidas”), enfraquecendo o maciço rochoso e causando o movimento relativo ao longo das descontinuidades existentes (Laubscher 1990).

Em síntese, a classificação *Mining Rock Mass Rating* (M-RMR) foi desenvolvida para aplicações mineiras por Laubscher (1975, 1977), sendo modificada por Laubscher & Taylor (1976). Esta classificação é determinada pela força de rotura da rocha intata, RQD, espaçamento das

continuidades e condições das descontinuidades. O valor de MRMR varia como o RMR, entre 0 e 100, valores estes que designam a qualidade do maciço rochoso de mau a muito bom. Esta classificação está dividida em cinco classe e dez subclasses. Cada uma das cinco classes tem um peso de 20 enquanto as subclasses compreendem um intervalo de 10.

Laubscher (1990) apresentou a relação entre o M-RMR e a tensão *in situ* através da expressão [11]

$$\sigma_{cm} = \sigma_c \times \frac{\text{MRMR} - \text{valor de } \sigma_c}{100} \quad [11]$$

Onde:

σ_{cm} – Resistência à compressão uniaxial média;

σ_c – Resistência à compressão uniaxial na rocha intata;

σ'_c – Resistência efetiva à compressão uniaxial na rocha intata.

A *Mining Rock Mass Classification* apresenta ajustes na orientação das descontinuidades, efeito de fissuração em resultado do desmonte por explosivos (*blasting*) e do grau de alteração para estimar o dimensionamento da resistência do maciço rochoso (*Design Rock Mass Strength, DRSM*) para efeitos de projeto Laubscher (1990).

Quadro 28. Classificação das classes geomecânicas do maciço rochoso pela M-RMR (Laubscher 1990).

Classe	1		2		3		4		5	
Peso	100 - 81		80 - 61		60 - 41		40 - 21		20 - 0	
Descrição	Muito bom		Bom		Razoável		Fraco		Muito fraco	
Subclasses	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B

Laubscher & Jakubec (2000) apresentaram a classificação *Mining Rock Mass Rating (M-RMR)* totalmente revista. Este sistema revisto trouxe significativas melhorias para ultrapassar os problemas encontrados quando as classificações geomecânicas são aplicadas em ambiente mineiro, especificamente nas operações de escavação de maciços rochosos. As principais alterações introduzidas na M-RMR apresentada por Laubscher & Jakubec (2000) foi a eliminação do RQD (*Rock Quality Designation*) como um parâmetro compulsivo, sendo este substituído pelo preenchimento das descontinuidades e pela resistência mecânica do maciço rochoso.

As grandes diferenças entre a M-RMR, comparado com as restantes classificações geomecânicas são as seguintes (Laubscher & Jakubec 2000):

- Conceito de escala na resistência (rocha intata, bloco de rocha ou maciço rochoso);
- Inclusão do preenchimento das descontinuidades de veios/filões;
- Abandono do RQD;
- Ajustes mineiros (em comparação com o Q-system).

2.6.7. Q-System – Rock Tunneling Quality Index

A classificação *Q-system* foi desenvolvida por Barton et al. (1974, 1977, 1980) no Instituto Geotécnico Norueguês (NGI – *Norwegian Geotechnical Institute*; pormenores em NGI 2013), para a avaliação geomecânica do maciço rochoso e os requisitos para o suporte de túneis, tendo tido origem na análise de mais de 200 casos de estudo de túneis na Escandinávia (NGI 2013). A aplicação desta classificação é especialmente recomendado para túneis e cavernas com teto em forma de abóboda (Singh & Goel 1999, 2011). O valor numérico do *Q-system* varia numa escala logarítmica entre 0,001 (para maciços de qualidade muito fraca) a 1.000 (para maciços de qualidade excepcional). Quando a qualidade do maciço varia marcadamente de local para local, é desejável classificar as zonas geotécnicas separadamente (Barton et al. 1974, 1977, 1980).

O sistema Q (*Q-system*) é composto por seis parâmetros (Figura 30) que definem a classificação que é composto pela expressão [12] da seguinte forma:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \times \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad [12]$$

Onde:

RQD – *Rock Quality Designation* (Deere et al. 1967), i.e., a qualidade da rocha;

J_n – Número de descontinuidades;

J_r – Rugosidade das descontinuidades;

J_a – Índice de alteração das descontinuidades;

J_w – Fator de redução do caudal de água;

SRF – *Stress reduction factor* – estado de tensão do maciço rochoso.

A expressão anterior traduz o cálculo do índice *Q-system*, a qual pode ser definida pela multiplicação de três parâmetros: compartimentação do maciço (RQD/J_n), resistência ao corte (J_r/J_a) e tensão ativa (J_w/SRF).

O primeiro quociente representa a estrutura da massa rochosa e a medida do bloco-unitário. O valor de J_n aumenta a par do aumento do tamanho do túnel, caso sejam encontradas novas famílias de descontinuidades. O segundo quociente representa as características de rugosidade e o atrito das paredes das descontinuidades e materiais nelas contidas. Este valor aumenta com a rugosidade e diminui com a alteração da superfície das descontinuidades. O terceiro quociente traduz um fator empírico que descreve o estado de tensão do maciço (Barton et al. 1974, 1980),

Figura 31.

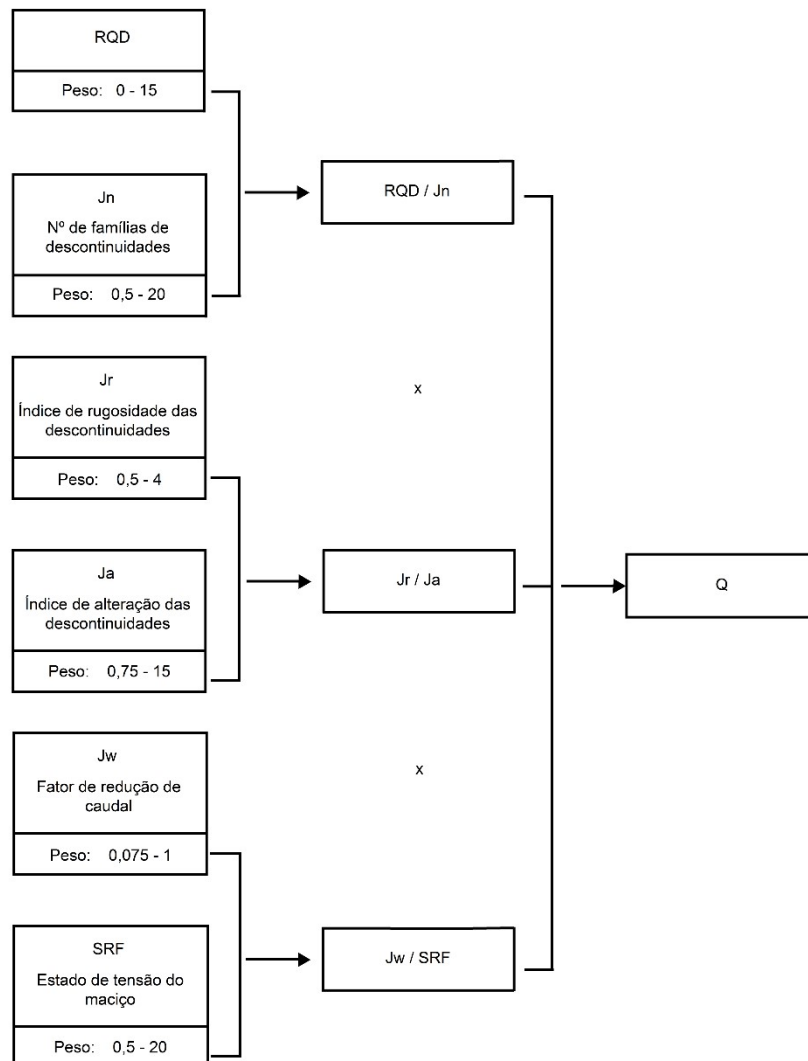


Figura 30. Esquematização para a obtenção do valor do Q -system.

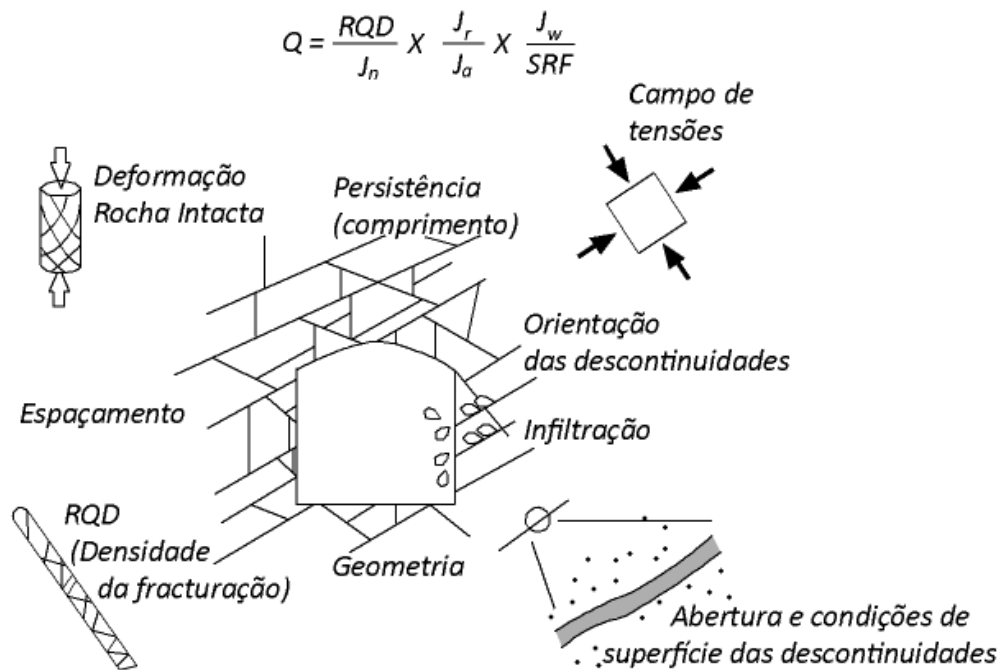


Figura 31. Visão de conjunto dos parâmetros que são considerados no Q-system (adaptado de Barton 2007).

Cada parâmetro que compõe os elementos, irá corresponder a um valor tabelado consoante a sua avaliação. No Quadro 29, Quadro 30, Quadro 31, Quadro 32, Quadro 33, Quadro 34 e Quadro 35, apresentam-se os seis parâmetros intervenientes na classificação *Q-system*.

Quadro 29. Índice de qualidade da rocha, RQD (adaptado de Deere et al. 1967 e de Barton et al. 1974).

Qualidade da rocha	RQD (%)	Notas
A. Muito fraca	0-25	i) Quando RQD é ≤ 10 (incluindo 0), o valor a adotar é 10.
B. Fraca	25-50	
C. Razoável	50-75	ii) a adoção de valores com intervalos de 5 é suficientemente adequada.
D. Boa	75-90	
E. Excelente	90-100	

Quadro 30. Número de famílias de descontinuidades, J_n (adaptado de Barton et al. 1974).

Número de famílias de descontinuidades	J_n	Notas
A. Nenhuma, ou poucas descontinuidades	0,5-1,0	
B. Uma família	2	
C. Uma família e uma aleatória	3	
D. Duas famílias	4	<i>i) Para interseções utilizar $3 \times J_n$</i>
E. Duas famílias e uma aleatória	6	
F. Três famílias	9	<i>ii) Para as bocas de entrada dos túneis utilizar $2 \times J_n$.</i>
G. Três famílias e uma aleatória	12	
H. Quatro ou mais famílias, descontinuidades aleatórias, maciços altamente fraturados	15	
I. Rochas esmagada, tipo solo	20	

Quadro 31. Índice de rugosidade das descontinuidades, J_r (adaptado de Barton et al. 1974).

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 descontínuas	4	<i>i) As descrições referentes às alíneas a. e b. referem-se a escalas de amostragem de dimensões pequena e média, respetivamente;</i>
B. Rugosas e irregulares, onduladas	3	<i>ii) Somar 1,0 se o espaçamento da família principal for maior que 3 m;</i>
C. Lisas onduladas	2	<i>iii) $J_r = 0,5$ pode ser utilizado para descontinuidades estriadas contendo lineações, se estas estão orientadas de acordo com menor resistência;</i>
D. Estriadas onduladas	1,5	<i>iv) Os valores de J_r e J_a devem ser obtidos aplicando-se à família de descontinuidades que for mais desfavorável para a estabilidade do ponto de vista da orientação e da orientação e da resistência ao corte, σ (onde $\sigma \approx \sigma_n \cdot \text{tg}(J_r/J_a)$).</i>
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	

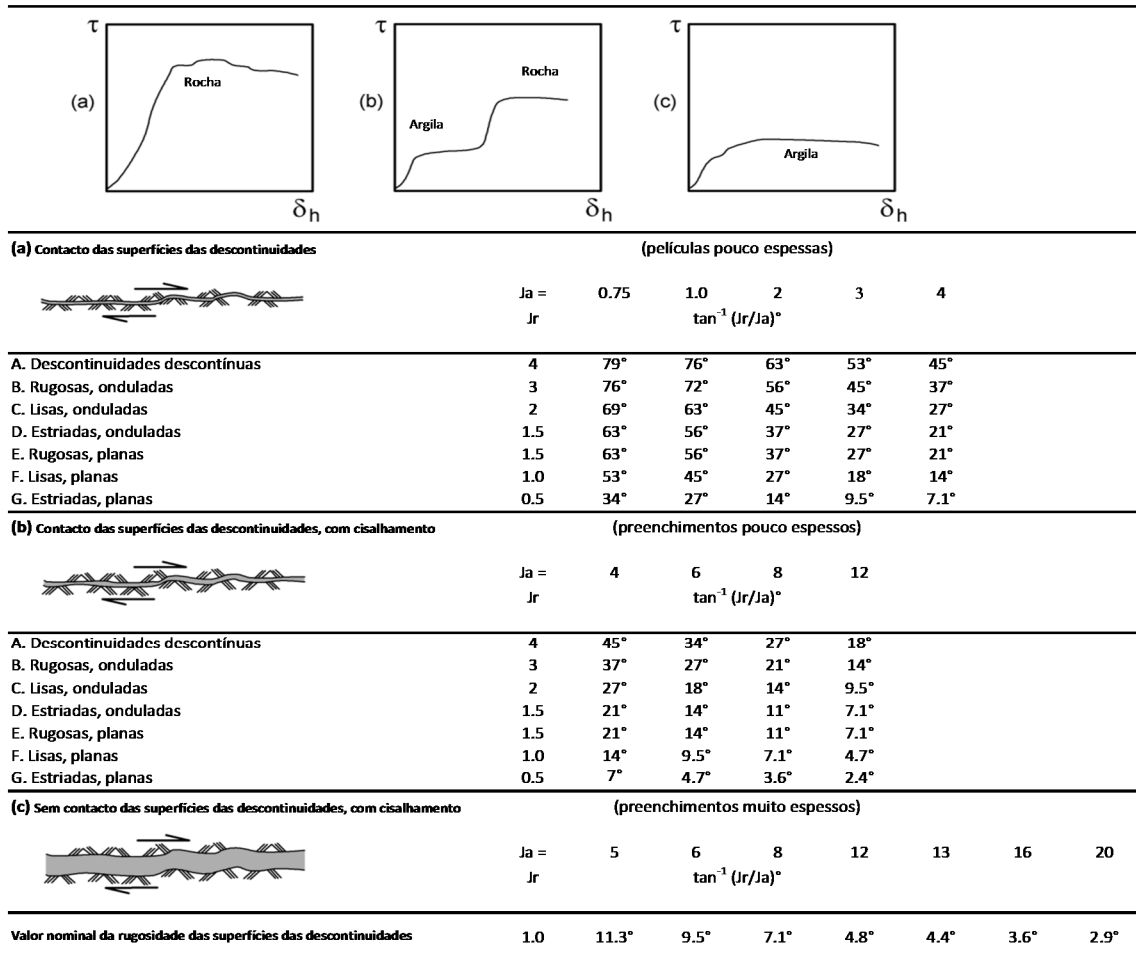
Quadro 32. Índice de alteração das descontinuidades, J_a (adaptado de Barton et al. 1974).

Índice de alteração das descontinuidades	J_a	$\phi_r(^{\circ})$	Notas
a. Contacto das superfícies das descontinuidades			
A. Paredes duras e compactas, enchimento impermeável	0,75	-	<i>i) Os valores ϕ_r, ângulo de atrito residual, são entendidos como uma aproximação às propriedades mineralógicas dos produtos de alteração, se existentes.</i>
B. Paredes não alteradas, somente com descoloração 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 <5mm)	6	16 - 24	
H. Preenchimentos argilosos subconsolidado (contínuo, espessura <5mm)	8	12 - 16	
A. Preenchimentos argilosos expansivos, i.e., montmorilonite (contínuo, espessura <5mm)	8,0 - 12,0	6 - 12	
c. Sem contacto das superfícies das descontinuidades quando cisalhadas			
K., L. Zonas ou bandas com M. rochas desintegradas ou esmagadas e argila (ver G, H e J para as condições argilosas)	6,0 - 8,0 ou 8,0-12,0	6 - 24	
N. Zonas ou bandas de argilas siltosas ou arenosas, pequena fração argilosa, não brandas	5		
O. Zonas contínuas espessas ou bandas argilosas	10,0 - 13,0		
P. & R. (ver G, H. e J. para condições argilosas)	6,0 - 24,0		

Quadro 33. Fator de redução do caudal, J_w (adaptado de Barton et al. 1974).

Fator de redução do caudal	Pressão de água aproximada (MPa)	J_w	Notas
A. Escavações secas ou caudal muito baixo, i.e., localmente <5L/min	< 0,1	1	
B. Caudal ou pressão médios que ocasionalmente arrastam o enchimento das descontinuidades	0,1 - 0,25	0,66	<i>i) Os fatores nos casos C a F são estimados para condições naturais; aumentar J_w se forem efetuadas drenagens.</i>
C. Caudal elevado ou pressão elevada em rochas competentes com descontinuidades sem preenchimento	0,25 - 1,0	0,5	
D. Caudal elevado ou pressão elevada	0,25 - 1,0	0,33	
E. Caudal excepcionalmente elevado ou pressão explosiva, decaindo com o tempo	> 1,0	0,2 - 0,1	<i>ii) Problemas especiais originados pela formação de gelo não são considerados.</i>
F. Caudal ou pressão excepcionalmente elevados	> 1,0	0,1 - 0,05	

Quadro 34. Síntese complementar dos parâmetros J_r e J_a estão claramente relacionadas com o comportamento da rocha (adaptado de Barton & Bieniawski 2008).



Quadro 35. Estado de tensão do maciço, SRF (adaptado de Barton et al. 1974).

Estado de tensão do maciço	SRF	Notas		
a. Zonas de fraqueza intersectando a escavação, o que pode 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>i) Para a situação A. reduzir os valores de SRF de 25 - 50%, apenas se as zonas de cisalhamento relevantes não intersectarem a escavação.</i>		
G. Descontinuidades abertas, fracturação muito intensa (qualquer profundidade)	5			
Estado de tensão do maciço	σ_c/σ_1	σ_t/σ_c	SRF	Notas
b. Rocha competente, problemas de tensão na rocha				
H. Tensões baixas, próximo da superfície	> 200	> 13	2,5	<i>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);</i>
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	
M. Explosões intensas de rochas maciças	< 2,5	< 0,16	10 - 20	
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	

O valor do *Q-system* relaciona-se com o comportamento da escavação e o suporte requerido, através da definição de um parâmetro adicional designado por *dimensão equivalente* (D_e) da escavação (Barton et al. 1974). A dimensão equivalente, que é função do tamanho e do propósito da escavação, é obtida pela razão apresentada na expressão [13] seguinte entre o vão livre (ou o diâmetro ou a altura da escavação), por um índice de segurança, o ESR – *Excavation Support Ratio*.

$$D_e = \frac{\text{Vão livre, diâmetro ou altura (m)}}{\text{ESR}} \quad [13]$$

O valor de ESR está relacionado com a finalidade de cada escavação e com o grau de segurança exigido pelo sistema de suporte instalado para manter a estabilidade da mesma. Barton et al. (1974) propõem os valores apresentados no Quadro 36.

Quadro 36. Tipos de escavação e valores de ESR – *Excavation Support Ratio* (adaptado de Barton et al. 1974).

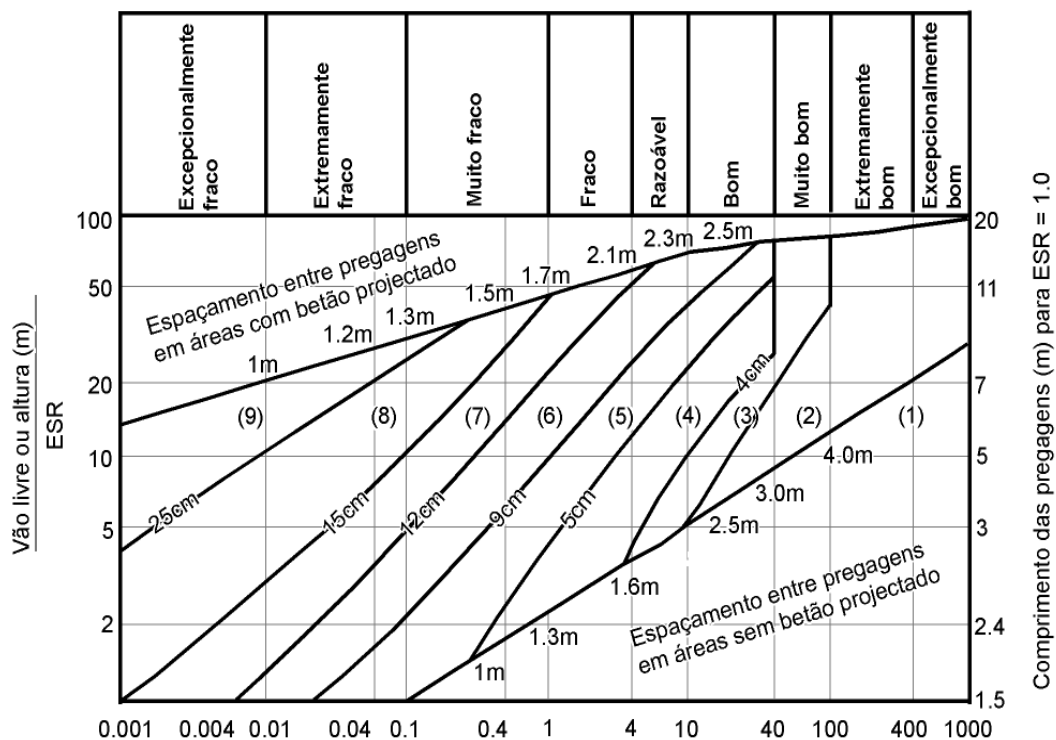
Classe	Tipo de escavação	ESR
A	Cavidades mineiras temporárias	2,0 - 5,0
B	Cavidades mineiras definitivas, túneis de aproveitamentos hidráulicos, túneis piloto, túneis de desvio, escavações superiores de grandes cavidades.	1,6 - 2,0
C	Cavernas de armazenamento, estações de tratamento de águas, pequenos 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

No caso de túneis escavados com recurso a tuneladora (tipo TBM), estes valores sofrem algumas alterações, devendo ser utilizados os apresentados no Quadro 37.

Quadro 37. Valor de ESR a considerar para túneis TBM (Barton 2006, Hoek 2007). Para o caso dos túneis de tráfego dever-se-á utilizar o valor 0,5 no caso de túneis longos destinados a comboios de alta velocidade e de tráfego automóvel.

Tipo de Escavação	ESR
Túneis piloto	2
Túneis para água e esgotos	1,5
Túneis de tráfego	0,5 a 1,0

Utilizando os valores de *Q*-system e da dimensão equivalente no ábaco da Figura 32 é possível determinar a categoria do suporte definitivo.



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

- (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

Figura 32. Ábaco para determinação do *Q*-system e da categoria do suporte (adaptado de Barton et al. 1974, Barton 2000, Grimstad & Barton 1993).

O valor de ESR permite também a obtenção de outros parâmetros. Barton et al. (1974) propuseram a relação apresentada na expressão [14], para a determinação do vão máximo (L) para um maciço auto-portante:

$$L = 2 \times RSR \times Q^{0,4} \quad [14]$$

Por outro lado, ainda possível estimar o comprimento das pregagens/ancoragens a aplicar, através da largura da escavação (B), do valor de ESR e da altura da escavação (H) (Quadro 38).

Quadro 38. Cálculo do comprimento de pregagens e ancoragens a partir de B, ESR e H (adaptado de Barton et al., 1974).

	Pregagens	Ancoragens
Teto	$L(m) = 2 + \frac{0,15 \times B}{ESR}$	$L(m) = \frac{0,40 \times B}{ESR}$
Hasteal	$L(m) = 2 + \frac{0,15 \times H}{ESR}$	$L(m) = \frac{0,35 \times B}{ESR}$

Como na classificação RMR, existe uma correlação entre o índice Q e o módulo de deformabilidade (E_M) do maciço rochoso, Barton et al. (1980) e Barton & Quadros (2002), propuseram as seguintes expressões [15] e [16]:

$$E_M(GPa) = 25 \times \log(Q); \quad Q > 1 \quad [15]$$

$$E_M(GPa) = 10 \times Q^{0,36} \quad [16]$$

2.6.8. Q_{TBM} – Q-system com recurso à tuneladora (TBM)

O Q_{TBM} é ilustrado na Figura 33, alguns dos parâmetros no topo da figura sugerem a maior ou menor dificuldade em termos de escavabilidade dos terrenos. É de notar as diferenças dos parâmetros do Q apresentados na expressão seguinte descrevem a estabilidade da rocha e a necessidade de suporte. Os parâmetros usados para o Q_{TBM} são os seguintes [17]:

$$Q_{TBM} = \frac{RQD_0}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \times \frac{\sigma_c \text{ ou } \sigma_{tm}}{\frac{F^{10}}{20^9}} \times \frac{20}{CLI} \times \frac{q}{20} \times \frac{\sigma_\theta}{5} \quad [17]$$

Onde:

RQD₀ - RQD (%) ao longo da direção do túnel. O RQD₀ também é usado para avaliar o valor de Q e estimar a resistência da rocha;

J_n, J_r, J_a, J_w e SRF - parâmetros da classificação Q-system de Barton et al. (1974);

F - força de impulso de corte média (tnf);

σ_{cm} ou σ_{tm} - valor estimado da resistência do maciço rochoso (MPa);

CLI - índice relativo à duração, em termos de abrasividade, das peças de corte (cutter-life index) (e.g., 4 para quartzito, 90 para calcário);

Q - percentagem de quartzo;

σ_{tm} - estimativa da tensão perimetral, em MPa, induzida na face do túnel (normalizada para uma profundidade aproximada de 100 m = 5MPa).

As melhores estimativas para cada parâmetro devem ser incluídas numa secção longitudinal geológico-estrutural do túnel a ser projetado. É de notar que o valor de Q não deve ser calculado usando correlações com o RMR (Barton & Bieniawski 2008).

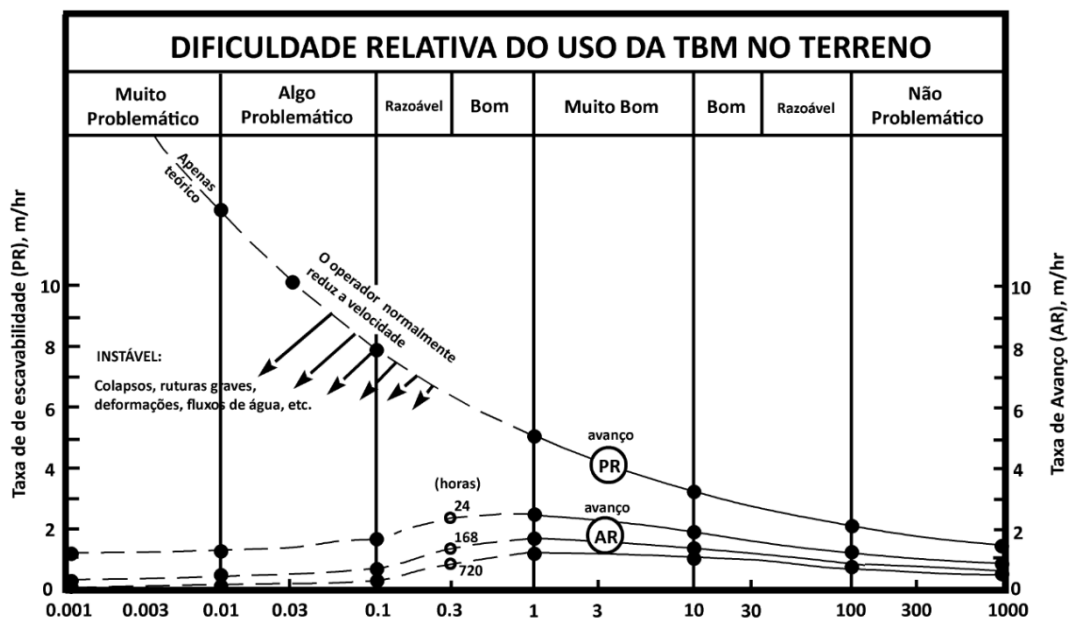


Figura 33. Ábaco síntese sobre o uso da “tunneling boring machine”, TBM (tuneladora) e a classificação Q_{TBM} (adaptado de Barton 2000).

2.6.9. Correlação RMR – Q-System

As classificações geomecânicas RMR e *Q-system* foram desenvolvidas com um propósito comum da avaliação dos maciços rochosos com base numa caracterização geotécnica qualitativa e semi-quantitativa e ensaios geomecânicos quantitativos (Bieniawski 1989, Barton 2006, ISRM 2007). A sua aplicação é também eficaz, quer em rochas de boa qualidade geotécnica, quer em rochas de má qualidade.

Os sistemas de classificação referidos encontram-se bem adaptados para a fase de projeto de escavações subterrâneas, apoiado como avaliação prévia do túnel assente, entre outros, em estudos de campo de geociências de engenharia, de geofísica aplicada, de ensaios geomecânicos e de sondagens com recuperação de rocha. Estes sistemas, apesar de empíricos, fornecem estimativas realistas para fins de modelação geomecânica, apoiada por geofísica (em particular, métodos sísmicos) que poderá auxiliar na caracterização das zonas geotécnicas de qualidade mais fraca. Tal como destacam Barton & Bieniawski (2008) *“(…) after 35 years of use throughout the world in tunnelling and mining, the record of the RMR and Q systems in geological and engineering practice speaks for itself. These two systems have become entrenched as the most effective empirical design tools for determination of rock mass quality and estimating rock mass properties and tunnel support measures”*. Não obstante, é essencial que o seu uso prossiga durante a execução da obra sendo indispensável a monitorização e o registo através da aplicação de, pelo menos, uma das classificações durante a obra, de forma a quantificar as novas condições encontradas e a adequar os métodos de suporte ao maciço (Bieniawski 1989, Barton 2006, Barton & Bieniawski 2008).

A semelhança entre as duas classificações acima apresentadas, deve-se ao uso de parâmetros similares no cálculo da qualidade do maciço rochoso. Os parâmetros usados (Quadro 39) por estas duas classificações são os seguintes:

Quadro 39: Parâmetros usados nas classificações RMR e Q-system.

Parâmetros	RMR	Q-System
Fluxo de água	x	x
Geologia e geometria ³	x	x
Resistência à compressão uniaxial	x	-
Resistência em relação à tensão <i>in situ</i>	-	x
Diferentes pesos ⁴	x	x

³ A geologia e a geometria são igualmente contabilizadas, apesar de a abordagem ser ligeiramente diferente.

⁴ O sistema Q e o RMR fundamenta-se na adoção de diferentes pesos para os mesmos parâmetros e no uso de um ou outro fator diferente.

A comparação e correlação entre estes dois sistemas de classificação, estabeleceram-se a partir do estudo de mais de 100 casos provenientes de diferentes continentes (Bieniawski 1989). Desta forma, foram desenvolvidas diversas expressões ao longo dos anos, por diferentes autores, tal como consta no Quadro 40.

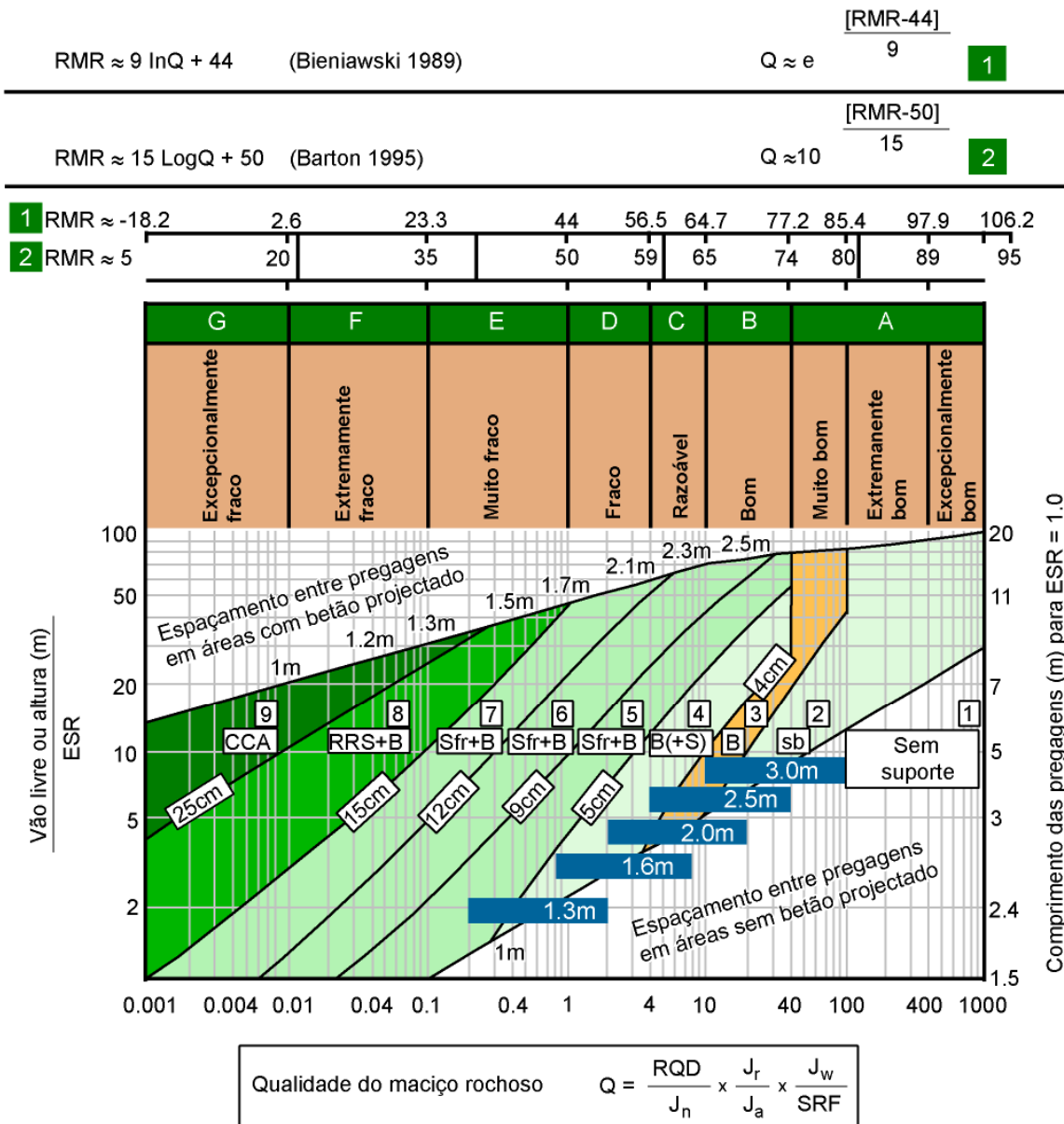
Quadro 40. Exemplos de correlações entre Q-system e RMR estabelecidas por diferentes autores.

Proposta correlação RMR – Q-System	Autores
$RMR = 5,9 \cdot \ln Q + 43$	Rutledge & Preston (1978)
$RMR = 5,4 \cdot \ln Q + 55,2$	Moreni (1980)
$RMR = 5 \cdot \ln Q + 60,8$	Cameron-Clarke & Budavari (1981)
$RMR = 10,5 \cdot \ln Q + 41,8$	Abad et al. (1984)
$RMR = 9 \cdot \ln Q + 44$	Bieniawski (1989)
$RMR = 15 \cdot \log Q + 50$	Barton (1995)

Grimstad & Barton (1993) e Barton (2000) propuseram um ábaco que uniformiza os resultados para as correlações propostas por Barton (2006) e Bieniawski (1993), possibilitando uma consulta direta do ábaco da classificação Q, a partir do valor do RMR (Figura 34).

Para que esta correlação seja corretamente aplicada é impreterível que se alcance os seguintes pontos (Barton & Bieniawski 2008):

- Assegurar que a recolha dos parâmetros classificativos seja fiável, através da execução de ensaios normalizados, da análise de amostras, do reconhecimento geológico e caracterização geotécnica, estudos de campo e de geofísica;
- Seguir os procedimentos estabelecidos pelas classificações Q-system e RMR e determinar corretamente os seus valores médios;
- Utilizar ambos os sistemas e confirmar com pelo menos duas correlações publicadas por Bieniawski e Barton;
- Estimar o suporte e os requisitos de reforço do maciço rochoso;
- Executar modelação numérica em casos apropriados e assegurar que a informação disponibilizada é suficiente;
- Ter em conta o processo construtivo e estimar a taxa de avanço no caso do uso da TBM.



- 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

Figura 34. Ábaco com correlações do Q-system com o RMR, baseado nas propostas de Grimstad & Barton (1993) e Barton (2000), (adaptado de Barton & Bieniawski 2008).

2.7. Índices Geológico-Geomecânicos

2.7.1. GSI – *Geological Strength Index*

O GSI – *Geological Strength Index* (Índice Geológico de Resistência) foi desenvolvido para complementar a aplicação do critério de rotura de Hoek & Brown (1980a,b, 1997) em materiais rochosos (competentes ou brandos). Nos anos 80, do século passado, foi desenvolvido um critério com intuito de fornecer informação para apoiar a análise geotécnica em projetos de escavações subterrâneas (Hoek & Brown 1980a,b, Hoek et al. 1992, 2002, Hoek & Marinos 2007 e referências nos trabalhos citados). Este traduz-se numa equação que apresenta um valor prático por estar formulada a partir de parâmetros estimados através de estudos geológicos de campo. O critério original de Hoek & Brown (1980a,b) traduz-se, então pela expressão [18] e pressupõe que a rotura da massa rochosa é controlada por processos dinâmicos nos blocos de rocha intacta separados por descontinuidades.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \times \left(m_i \times \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{1/2} \quad [18]$$

Onde:

σ'_1 - tensão efetiva principal máxima à rotura;

σ'_3 - tensão efetiva mínima à rotura;

m_i, s - constantes do material; $s = 1$, para o material rochoso;

σ_c - resistência à compressão simples da rocha intacta.

Este critério viria a sofrer alterações e melhoramentos, tendo a expressão anterior tomando a designação de *critério generalizado de Hoek & Brown* (Hoek et al. 2002) [19]:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \times \left(m_b \times \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad [19]$$

Onde:

m_b - valor reduzido do parâmetro m_i ;

s, a - constantes que dependem do material-rocha.

Enquanto os valores apresentados na expressão [18] podem ser obtidos a partir de ensaios, os valores de m_b, s, a , são constantes aferidas através de correlações, a partir do valor do GSI, que

varia entre 0 e 100. A qualidade do maciço rochoso a partir do parâmetro GSI pode ser avaliada da seguinte forma (Quadro 41).

Quadro 41. Avaliação da qualidade do maciço rochoso através do GSI (Hoek 1994, 2007).

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

A classificação GSI apresenta seis classes principais qualitativas relacionadas com a geoestrutura, sendo a maior adaptadas de Terzaghi (1946). O GSI pretende, assim, traduzir a qualidade geológica-geotécnica do maciço. Este é o único sistema que providencia um procedimento integrado para a estimativa dos parâmetros do critério de Hoek & Brown (1980a,b) e do correspondente critério de rotura Mohr-Coulomb (Hoek et al. 1992, Hoek 1994, Hoek & Marinos 2007). Uma vez usado este índice é ainda possível estimar o valor do módulo de deformabilidade a partir de correlações. O índice GSI apoia-se, assim, na descrição de dois parâmetros fundamentais do maciço rochoso, a geoestrutura (em termos de compartimentação do maciço rochoso) e as condições geológico-geotécnicas das descontinuidades.

O valor de GSI pode ser determinado por intermédio do valor de RMR, tendo em consideração que (Hoek 2007): RMR > 23; ou seja, o índice para a presença de água é igual ao peso 15 (i.e. maciço seco) e o índice de relação entre a orientação das descontinuidades e a orientação da escavação é muito favorável (peso 0). Deste modo, a relação entre os dois índices será a seguinte [20]:

$$GSI = RMR - 5 \quad [20]$$

Para Barton (2011), a relação algébrica anterior dado o seu perfil simplista e redutor, não é minimamente adequada no estado atual do conhecimento das classificações geomecânicas e deverá ser desprezada. Entretanto, outros autores referem esta relação como válida e plausível para se proceder a uma avaliação provisória do GSI (e.g., Hoek 2007, Singh & Goel 2011).

Na utilização do valor do Q para a obtenção do valor de GSI, também está condicionada, visto que o efeito de tensão do maciço é desprezado. Assim sendo, é necessário calcular uma variante do valor de Q, o Q', que é apresentado na seguinte expressão [21] (Singh & Goel 2011):

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \quad [21]$$

O valor do GSI será dado portanto, pela expressão [22]:

$$GSI = \ln Q' + 44 \quad [22]$$

Dada a existência de um ábaco (Hoek & Marinos 2000, Marinos & Hoek, 2001, Marinos et al. 2005, 2007) onde são descritas as características da geoestrutura do maciço rochoso, em termos de compartimentação e o estado das descontinuidades, do qual se pode igualmente avaliar o intervalo do valor do GSI (Figura 35).

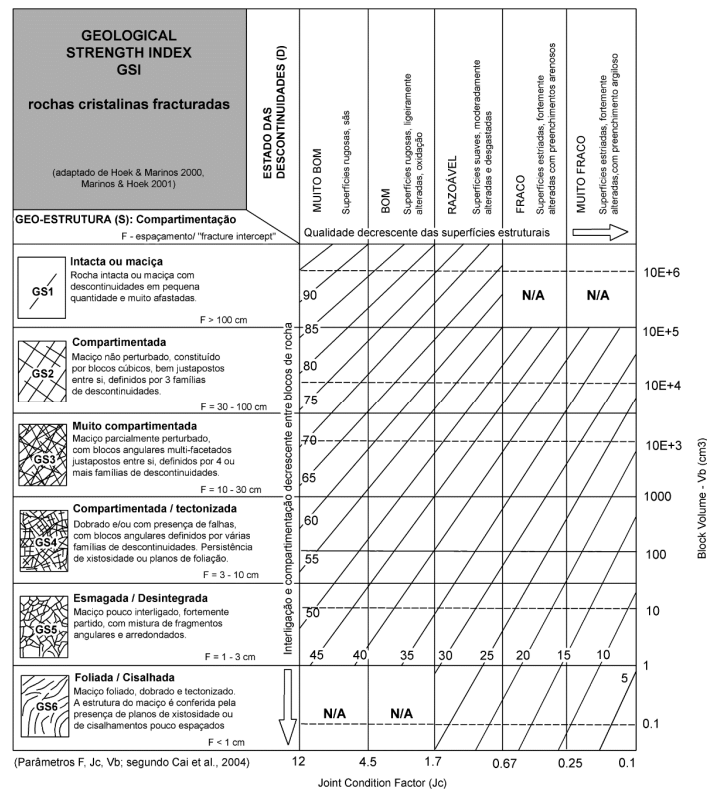


Figura 35. Ábaco para estimativa do GSI baseado na inspeção das condições geológicas (Marinos & Hoek 2000, Marinos & Hoek 2001), cuja versão sofreu atualizações em termos de quantificação da compartimentação (parâmetros F, Jc, Vb) propostas por Cai et al. (2004). Para pormenores sobre a aplicação dos parâmetros anteriores consultar Cai et al. (2004) ou Singh & Goel (2011).

Face à especificidade das rochas metassedimentares, Hoek et al. (1998) propuseram um novo ábaco (Figura 36) que privilegia as estruturas tectónicas em rochas metamórficas muito deformadas e brandas (Marinos & Hoek 2001, Marinos et al. 2005, 2006).

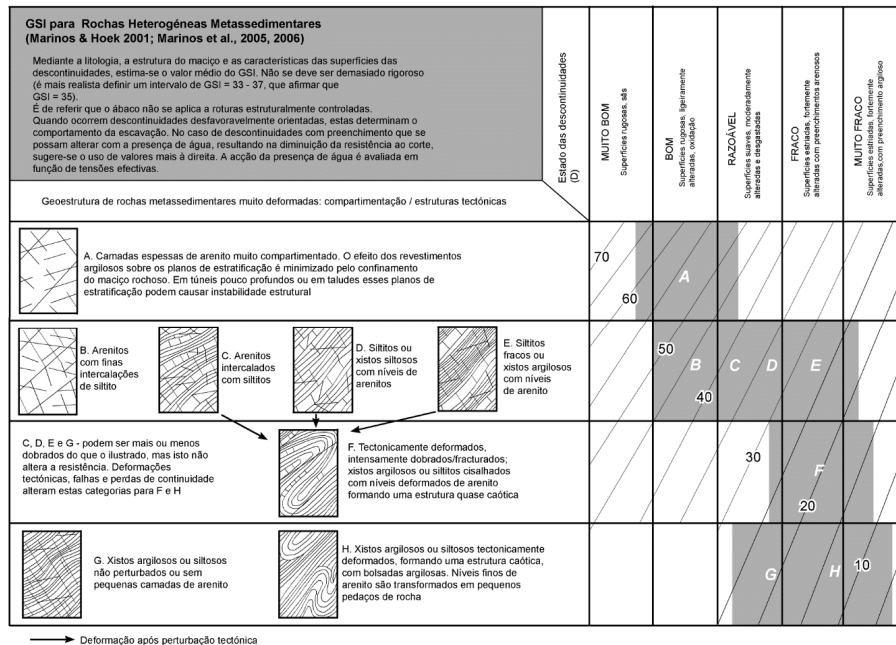


Figura 36. Ábaco para estimativa do GSI baseado rochas metassedimentares (Marinos & Hoek 2001, Marinos et al. 2005, 2006).

2.7.2. HP – Hydro-Potential Value

Nos maciços rochosos fraturados o volume e caudal de fluxo de água subterrânea dependem, entre outros, da abertura das fraturas e da sua rugosidade (e.g., Snow 1969, Black 1987, CFCFF 1996, Wang 2000, Hamm et al. 2007, Hsu et al. 2011). A abertura, estando relacionada com a porosidade, irá influenciar o volume. Por seu turno, a rugosidade irá determinar o caudal através do maciço rochoso. Estes dois parâmetros são usados nas classificações geomecânicas para fins de escavações subterrâneas (Price 2009, Scesi & Gattinoni 2009).

O fluxo de água subterrânea através dos maciços rochosos fraturados é controlado por diversas características físicas do maciço rochoso que se interrelacionam, tais como (Gates 1997, 2003):

- Heterogeneidade litológica;
- Qualidade da rocha;
- Parâmetros hidrogeotécnicos relacionados com as descontinuidades (i.e., número, densidade, rugosidade, condutividade hidráulica, abertura, conectividade).

Gates (1995, 1997, 2003) propôs o *Hydro-Potential (HP) value* como um índice hidrogeomecânico baseado numa técnica semi-quantitativa que avalia o potencial hidráulico em maciços rochosos, podendo esta ser adaptada para estimar infiltrações de água em escavações subterrâneas. O valor HP é o potencial para um maciço rochoso transmitir hidráulicamente água subterrânea. Este método constitui uma técnica simples e rápida usada para avaliar o potencial geohidráulica nas vizinhanças de afloramentos rochosos e ainda os maciços intervencionados para efeitos construtivos de galerias subterrâneas (Gates 1997, Price 2009).

Esta técnica resulta de uma modificação do *Q-system* proposto por Barton et al. (1974) – e atualizações em Barton et al. (1977, 1980), Barton (2000, 2006) –, anteriormente descrita. O método descreve seis características das descontinuidades, atribuindo um valor numérico (peso) a cada parâmetro com base em várias tabelas, que serão apresentadas mais à frente. O *Hydro-Potential value* (ou, simplesmente, *HP-value*) é dado pela expressão [23], (Gates 1997, 2003):

$$HP_{\text{value}} = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_k \times J_{af}} \right) \times J_w \quad [23]$$

Onde:

RQD - índice de qualidade da rocha;

J_n - número de famílias de descontinuidades;

J_r - índice de rugosidade das descontinuidades;

J_{af} - fator de abertura e forma das descontinuidades;

J_k - fator de condutividade hidráulica das descontinuidades;

J_w - fator de percolação de água nas descontinuidades.

Os valores numéricos de HP variam entre 1.33×10^{-3} (maciços de muito fraca qualidade), e 800, (maciços de qualidade excelente). Seguidamente são descritos os seis parâmetros das descontinuidades considerados no cálculo do *HP-value*.

O valor do RQD, pode ser obtido a partir da classificação Deere et al. (1967), como também por intermédio da correlação empírica de Palmström (1975), ambas descritas anteriormente.

Referente ao parâmetro **J_n** (número de famílias de descontinuidades), a sua avaliação é igual à proposta por Barton et al. (1974, 1980), pelo que a é remetida para o Quadro 30. O índice de rugosidade das descontinuidades (**J_r**), a sua avaliação, é semelhante ao parâmetro anteriormente descrito (**J_n**), adota-se a proposta por Barton et al. (1974, 1980), já apresentada no Quadro 31.

Quanto ao fator de abertura e forma das descontinuidades, **J_{af}**, são características de extrema importância para a avaliação do fluxo ao longo das descontinuidades. As propostas de Hencher

(1987) e Harp & Noble (1993) foram adotadas por Gates (1997, 2003) propondo uma nova tabela que inclui as descontinuidades com aberturas no intervalo 0,1 mm a 20 mm, justificando que é tipicamente neste intervalo que se situam os túneis com elevados caudais e descontinuidades pouco abertas. De acordo com Gates (1997, 2003), o registo do percentil 90 da média das aberturas é suficiente. O Quadro 42 apresenta as descrições e os pesos propostos por Gates (1997, 2003) para o parâmetro J_{af} .

Quadro 42. Descrição e pesos para o parâmetro J_{af} (adaptado de Hencher 1987, Harp & Noble 1993, Gates 1997, 2003).

Descrição	Pesos
Descontinuidades todas fechadas, < 0,1 mm	1,0
0,1 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 1,0 mm	1,2
1,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 5,0mm	1,4
5,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 10,0mm	1,8
10,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 20,0mm	2,5
20,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 50,0mm	5,0
50,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 100,0mm	7,5
100,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 200,0mm	10,0
Abertura de 90% das descontinuidades > 200,0mm	15,0

Relativamente ao J_k , (fator de condutividade hidráulica das descontinuidades), este fator é importante, uma vez que a condutividade hidráulica das descontinuidades é em função da presença ou ausência de preenchimento. As descontinuidades seladas com matéria mineral terão uma condutividade hidráulica muito baixa. Por outro lado, descontinuidades abertas e sem preenchimento terão um fluxo importante, devido à alta condutividade hidráulica (Gates 1997, 2003). O Quadro 43 resume as descrições e os pesos atribuídos ao parâmetro J_k . Os valores de condutividade hidráulica foram compilados de Freeze & Cherry (1979).

Quadro 43. Descrição e pesos para o parâmetro J_k (adaptado de Freeze & Cherry 1979; Gates 1997, 2003).

Descrição	Pesos	Condutividade hidráulica (m/d)
Descontinuidades fechadas ou seladas com calcite/quartzo; sem fluxo	1	$< 10^{-5}$
90% das descontinuidades com preenchimento argiloso; baixo fluxo	2	$10^{-3} - 10^{-2}$
90% das descontinuidades com preenchimento silto-arenoso; fluxo moderado	3	$10^{-2} - 10^{-1}$
90% das descontinuidades preenchidas por areia ou cascalho; fluxo moderado a abundante	3,5	$10^{-1} - 10^3$
90% das descontinuidades sem preenchimento; fluxo abundante	4	$10^3 - 10^5$
90% das descontinuidades abertas e sem preenchimento; fluxo muito abundante	5	$> 10^5$

Finalizando, o fator de percolação de água nas descontinuidades, J_w , é uma avaliação da água que sai das descontinuidades sendo inversamente proporcional à pressão da água nas descontinuidades (Barton et al. 1974, 1980). O Quadro 44 apresenta as descrições e os pesos atribuídos ao parâmetro J_w , sendo adaptado por Gates (1997, 2003) e complementadas as propostas de Barton et al. (1974, 1980) e Hencher (1987).

Quadro 44. Descrição e pesos do parâmetro J_w (adaptado de Barton et al. 1974, Hencher 1987, Gates 1997).

Descrição	Gotas/min ⁽⁵⁾	L/s	Pesos
Seco	< 1	$< 1 \times 10^{-6}$	1,00
Húmido	1-10	1×10^{-6} a 1×10^{-5}	0,94
Gotas	10 - 100	1×10^{-5} a 1×10^{-4}	0,86
Gotejante	> 100	1×10^{-4} a 1×10^{-3}	0,76
Escurrência	-	1×10^{-3} a 1×10^{-2}	0,66
Fluxo ligeiro	-	1×10^{-2} a 1×10^{-1}	0,50
Fluxo moderado	-	1×10^{-1} a 1	0,33
Fluxo elevado	-	> 1	0,20

Esta classificação hidrogeomecânica pode ser usada para estimar caudais de água subterrânea, em meio fraturado, em túneis (Gates 1997, 2003). De acordo com Gates (1997, 2003) e Scesi & Gattinoni (2009), caso:

- *HP-value* for superior a 3 - não são previsíveis fenômenos relevantes de circulação geohidráulica;
- *HP-value* for inferior a 3 - o maciço rochoso terá, potencialmente, circulação geohidráulica.

Assim sendo, o caudal, Q , é estimado de acordo com a seguinte expressão [24]

⁵ Uma gota tem uma capacidade de, no mínimo, 1×10^{-6} litros.

$$Q \left(\frac{L}{\text{min}} \right) = 3,785 \times (919,71e^{-2,314HP}) \quad [24]$$

2.8. Zonamentos Geotécnico e Geomecânico

O zonamento geotécnico é uma etapa fundamental dos estudos geotécnicos e visa definir maciços geológicos com idênticas respostas geotécnicas a curto e a longo prazo (Oliveira 1986, Zuquette & Gandolfi 2004, Galiza et al. 2011a,b). Inicialmente é efetuado um reconhecimento de campo para se definir os problemas cartográficos e geológico-estruturais do maciço rochoso em estudo e área envolvente (especialmente, a caracterização das unidades geológicas regionais e/ou locais, a descrição das litologias, a cartografia das macro e meso-estruturas, a identificação das zonas alteradas e a cartografia das suas espessuras, a localização das exurgências/infiltrações de água, etc.). Esta informação é completa com a realização de uma série de ensaios *in situ* e laboratoriais para definir, com maior rigor, os valores dos parâmetros geotécnicos e geomecânicos do maciço rochoso. Seguidamente, procede-se à recolha, tratamento, análise e interpretação dos dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos do maciço. Recorre-se, como referido, a bases de dados geológico-geomecânicas (por exemplo: ScanGeoData|BGD e SchmidtData|UCS; Galiza et al., 2011 a,b,c), as quais permitem efetuar cruzamentos sistemáticos de toda a informação e, assim, apoiar a interpretação de todos os geo-dados para o estabelecimento da cartografia de zonamento geotécnico (IAEG 1981a,b). Esta abordagem integrativa permite estabelecer o modelo geotécnico do maciço em estudo.

Resumidamente, o zonamento geotécnico baseia-se na classificação de unidades geotecnicamente “homogéneas”, que podem agrupar diferentes idades geológicas. Por sua vez, estas unidades podem ser divididas em “sub-unidades geotécnicas” ou “grupos geotécnicos”. O pormenor e o grau de homogeneidade dependerão da escala, do objetivo do mapa e dos dados disponíveis (González de Vallejo & Ferrer 2011). Esta forma de dividir o maciço em zonas que exibem comportamentos geotécnicos semelhantes, tem sido um valioso auxiliar para a engenharia geotécnica e a geologia de engenharia, permitindo assim a aplicação das mesmas técnicas em zonas com características semelhantes, permitindo o apoio no dimensionamento da obra e a otimização da mesma. Oliveira (1986) trata assim de limitar o maciço rochoso dentro de intervalos bem definidos e aceitáveis, relativos à deformabilidade, resistência, permeabilidade e estado de tensão.

O seguinte passo será o zonamento geomecânico que pretende avaliar a qualidade global do maciço recorrendo a uma síntese integrada: por um lado, com base, especialmente, nas características geológicas, no zonamento geotécnico (CFCCF 1996, ISRM 2007) e nas propriedades

geomecânicas (resistência mecânica, coesão, ângulo de atrito, deformabilidade, etc.) e, por outro lado, com a determinação baseada em sistemas multiparamétricos de índices geológico-geomecânicos (GSI, RQD), de classificações geomecânicas generalistas (RMR, Q-system, etc.) e de índices hidrogeomecânicos (HP-value). Logo, a partir desta síntese e da análise ponderada com base na similitude paramétrica dos resultados geomecânicos será possível uma divisão e seriação em unidades geomecânicas que esboçam as zonas geomecânicas de um dado maciço rochoso.

**Capítulo 3 – O aplicativo informático MGC-
RocDesign | Calc ('Mining Geomechanics
Classification systems for rock engineering
design'): considerações gerais**

3. O aplicativo informático MGC-RocDesign|Calc (*Mining Geomechanics Classification systems for rock engineering design*): considerações gerais

“Unfortunately, soils are made by nature and not by Man, and the products of nature are always complex... As soon as we pass from steel and concrete to Earth, the omnipotence of theory ceases to exist. Natural soil is never uniform. Its properties change from point to point while our knowledge of its properties is limited to those few spots at which the samples have been collected. The accuracy of computed results never exceeds that of a crude estimate, and the principal function of theory consists in teaching us what and how to observe in the field.” (Karl Terzaghi (1883-1963), In: The engineer as artist by Richard E. Goodman)

3.1. MGC-RocDesign|Calc: breve introdução

A recolha organizada e o armazenamento sistemático em bases de dados, seguido do processamento e da avaliação dos múltiplos dados, é muito importante em engenharia geotécnica e em engenharia de maciços rochosos (*rock engineering*), em particular ligados à escavação de túneis mineiros, de escavações subterrâneas ou de escavação de taludes rochosos. Assim, as bases de dados são vitais em engenharia geotécnica, desde a fase de caracterização geológico-geotécnica e prospeção geotécnica até às fases de projeto, de dimensionamento e de concepção (*design*), bem como nas tarefas de análise numérica no suporte e desenvolvimento de modelação em várias fases das investigações. Além disso, estas bases de dados funcionam como importantes repositórios de dados da informação obtida em projetos anteriores e serão muito úteis em projetos futuros. Portanto, as bases de dados neste campo estão em contínuo desenvolvimento devido, em grande parte, à rápida evolução informática dos últimos três decénios. O aparecimento de computadores cada vez mais robustos e sofisticados ao nível do *hardware* induziu, necessariamente, a criação de ferramentas de *software* variada e com níveis de superior exigência e funcionalidade, quer ao nível da programação básica e avançada, quer ao nível da interface gráfica tornando-se mais acessível e amigável ao utilizador. Outra situação que evoluiu de forma ciclópica foi a portabilidade, a robustez, a autonomia e a fiabilidade dos sistemas informáticos o que permitiu a sua utilização nos mais variados contextos de operacionalidade e de exigências de trabalho ao ar-livre e/ou em espaços confinados.

Do exposto ressalta claro que apareceram, desde logo, programas profissionais no circuito comercial (especialmente, o pacote informático líder na maioria das empresas, denominado *RocScience*[®]: *software tools for rock and soils*, com destaque para as ferramentas *RocData* / *RocSupport* / *RocLab*, entre outras, e o programa *ClasRock32*[®]: *Classification of Rock Masses* da *Geo&Soft International*) até inúmeros aplicativos de âmbito académico (*RMR Calculations*,

disponível online no sítio da EduMine (<http://www.edumine.com>); da folha de cálculo *Combining RMR-Q-Rmi* desenvolvida por Palmstrom (<http://www.rockmass.net>); *ClassMass* criado por Deliomanli & Onargan (2003); *TiAS Database System – Tunnel Information and Analysis System* de Marinos et al. 2013).

A Figura 37 ilustra alguns dos principais exemplos de aplicativos informáticos ligados às classificações geomecânicas de maciços rochosos disponíveis no mercado ou de circulação académica (a maioria *freeware*). Por fim, sublinhar que no mercado português não há conhecimento da existência de qualquer tipo de programas em formato básico ou avançado, mas apenas referir a existência de folhas de cálculo dispersas e confinadas às classificações RMR ou Q-system que foram criadas em ambiente empresarial ou académico. Neste último caso, integradas, em regra, no âmbito pedagógico das unidades curriculares de “Geomecânica Aplicada”, de “Mecânica das Rochas” ou de “Projecto de Tese” dos diversos mestrados das áreas das geoengenharias (especialmente, Engenharia Geotécnica e Geoambiente do ISEP, Engenharia Geológica da UA, Engenharia Geológica e de Minas do IST|UTL).

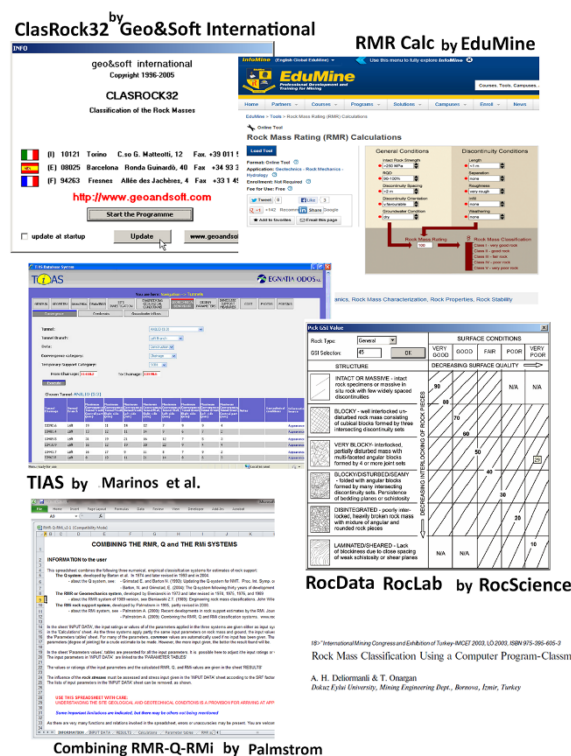


Figura 37. Exemplos dos principais programas ou aplicativos informáticos internacionais disponíveis no mercado ou de utilização académica, uns específicos sobre classificações de maciços rochosos ou índices geomecânicos (casos do *ClasRock32* [RMR e Q-system], do *RMR Calc* [RMR], do *Combining RMR-Q-RMi* [RMR-Q-system], *Classmass* [RMR, Q-system], e do *RocData/RocLab* do pacote *RocScience*® [GSI]) e outros integrados em programas avançados de gestão geotécnica de grandes obras de engenharia de túneis (caso do *TiAS Database System – “Tunnel Information and Analysis System”* – de Marinos et al. 2013).

Com efeito, o proceder à classificação dos maciços rochosos para fins de engenharia, sem que seja necessário o manuseamento exaustivo das diversas e complexas tabelas das classificações (algumas com várias edições de atualização), foi o ponto de partida para a concepção de uma “Calculadora Geomecânica” que é o objeto nuclear desta dissertação. Daí se ter criado e desenvolvido uma ferramenta informática funcional que permitisse a execução de todos esses processos e cálculos, de forma a apoiar o dimensionamento do suporte em maciços rochosos.

A “Calculadora Geomecânica” designada ***MGC-RocDesign|Calc: Mining Geomechanics Classification systems for rock engineering design*** (versão beta), é uma aplicação informática que pode ser executada em MS. Windows[®] e concebida para operar numa plataforma SIG (Sistemas de Informação Geográfica) em ambiente ArcGIS[®]. A ***MGC-RocDesign|Calc*** foi idealizada para ser intuitiva e funcional ao nível do carregamento da informação, do manuseamento, do processamento e da análise das classificações de maciços rochosos e dos índices geomecânicos para atingir um duplo-objetivo: a cartografia de zonamento geomecânico e a avaliação geomecânica para apoiar o dimensionamento do suporte em contextos de escavação subterrânea. Foi concebida para ser utilizada por geo-profissionais, investigadores ou estudantes do ensino superior (ao nível de mestrado ou superior). Nesta versão “beta” optou-se por apresentar, sempre que possível, os conteúdos do aplicativo em português e em inglês. Encontram-se em fase de desenvolvimento duas versões, totalmente autónomas, em cada um dos idiomas supracitados. No entanto, por razões operacionais e de prazos da dissertação de mestrado optou-se por realizar uma versão mista do ponto de vista linguístico, mas privilegiando a língua portuguesa, visto a não existência, tal como referido, de qualquer tipo destes aplicativos em português. Por fim, é referir que foi efetuado um esforço de integração na ***MGC-RocDesign|Calc*** de outras bases de dados (relacionadas com os dados básicos da descrição geológico-geotécnica e geomecânica dos maciços rochosos) criadas e desenvolvidas previamente no ISEP – ***ScanGeoData|BGD e SchmidtData|UCS*** (pormenores em Fonseca 2008, Ramos 2008, Galiza 2013) – e apresentadas à comunidade científica e técnica nas publicações de Fonseca et al. (2010) e de Galiza et al. (2011a,b,c) e ora designadas, simplesmente, por ***GeoTech|CalcTools***.

A Figura 38 ilustra a esquematização da organização ideal para um sistema de análise e informação integrada em túneis, com destaque para as fases da aquisição dos dados geológico-geotécnicos e geomecânicos (com as respetivas calculadoras ***GeoTech|CalcTools*** e ***MGC-RocDesign|Calc***, para apoiar a elaboração do zonamento geomecânico do maciço rochoso e a aplicação das classificações dos maciços rochosos para o dimensionamento do suporte).

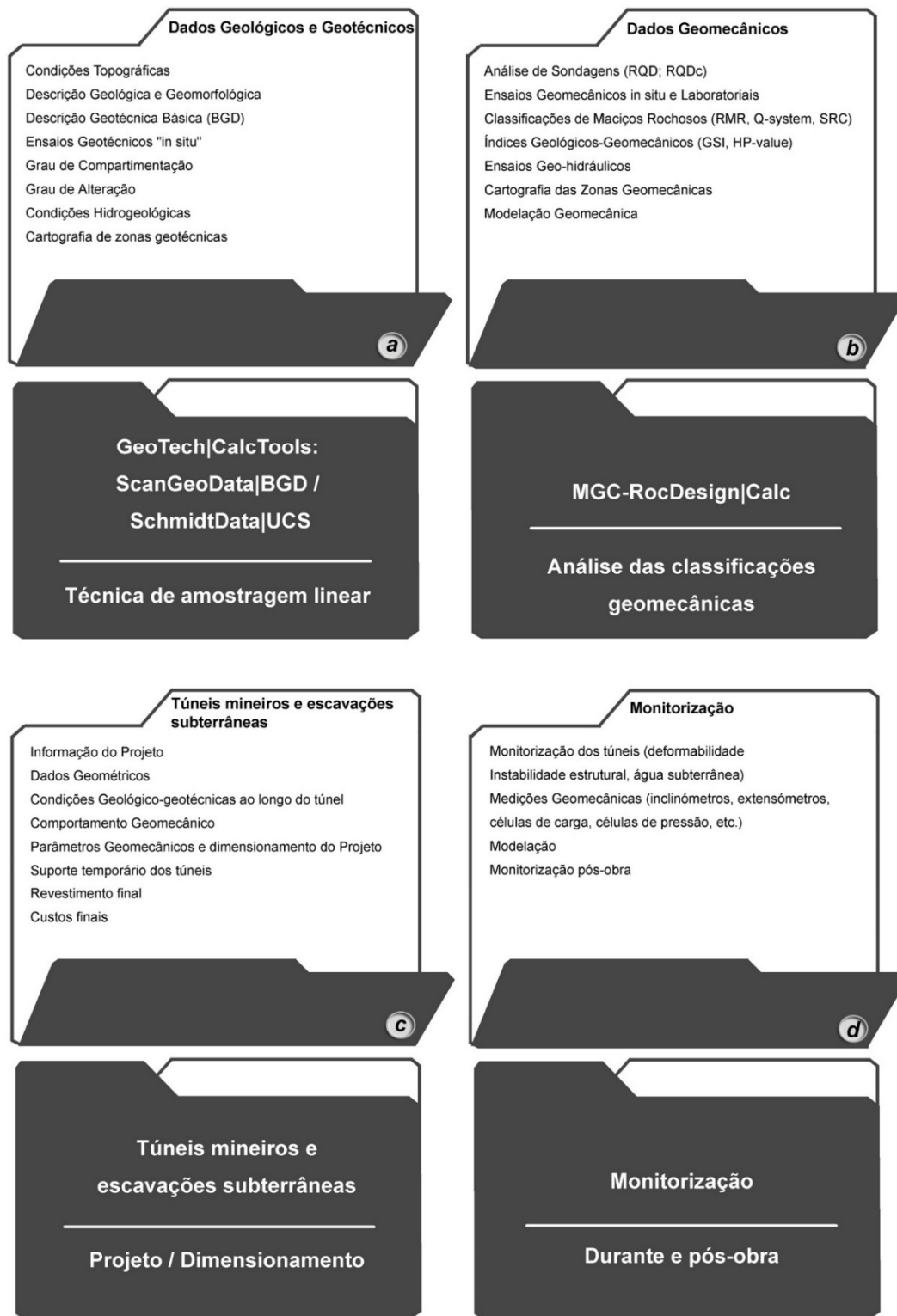


Figura 38. Esquema de organização ideal para um sistema de análise e informação integrada em túneis (inspirado no *TIAS Database System: Tunnel Information and Analysis System* de Marinós et al. 2013), com ênfase para as fases da aquisição dos dados geológico-geotécnicos e geomecânicos, com as respetivas calculadoras *GeoTech|CalcTools* e *MGC-RocDesign|Calc*, para se atingir o zonamento geomecânico do maciço rochoso e a aplicação das classificações dos maciços rochosos no apoio à decisão do dimensionamento do suporte.

Na concepção e desenvolvimento da **MGC-RocDesign|Calc** foi tido em linha de conta os seguintes objetivos, a saber:

- Criação de uma ferramenta informática original, funcional, interativa e robusta, que será, porventura, útil aos geo-profissionais, investigadores e estudantes do ensino superior dos cursos ligados às geoengenharias e geociências de engenharia;
- Facilitar o carregamento da inúmera informação geológico-geotécnica e geomecânica na fase de caracterização geológico-geotécnica para definir a cartografia de zonamento geotécnico dos maciços rochosos (aplicativo **GeoTech|CalcTools** de Fonseca et al. 2010), e para posterior agilização do processamento, da análise e da avaliação das classificações geomecânicas para apoiar a cartografia de zonamento geomecânico e a definição do suporte;
- Ligação a um Sistema de Informação Geográfica (SIG) para melhor e eficiente gestão dos inúmeros dados em termos de georreferenciação cartográfica e análise espacial SIG;
- Contribuir para a criação de um repositório dos dados de terreno, de laboratório e de projeto; estes dados são fundamentais, especialmente, para a elaboração de modelos conceptuais e numéricos, monitorização e estudos de retro-análise;
- Avaliação e correlação de dados que foram ou serão armazenados no futuro, no que diz respeito às condições geológicas, geotécnicas e geomecânicas de um dado local em estudo.

3.2. Descrição do processo construtivo da *MGC-RockDesign|Calc*

O processo construtivo foi alcançado através das seguintes etapas:

- Desenvolvimento da ferramenta informática para um fim específico;
- Organização e compilação de todos os dados que sejam relevantes;
- Seleção e classificação dos dados em relação à sua utilidade, valor e robustez técnico-científica;
- Carregamento dos dados;
- Processamento e análise dos dados e refinamento dos mesmos.

3.3. Estrutura da *MGC-RocDesign|Calc*

A estrutura da calculadora *MGC-RocDesign|Calc* centra-se basicamente em três categorias principais:

- **Categoria I:** Dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos. Esta diz respeito à caracterização geológica fundamental (CFCFF 1996) e à descrição geotécnica básica do maciço no terreno com recurso à técnica da amostragem linear (ISRM 1981, GSE 1995) e, por fim, aos ensaios in-situ e laboratoriais (ISRM 2007), Figura 39. Por isso, apresenta-se a base de dados do maciço rochoso que engloba a descrição geotécnica básica dos maciços rochosos e a avaliação geomecânica da resistência mecânica (GeoTech|CalcTools), bem como a integração desta informação tendo em vista a elaboração da cartografia de zonamento geotécnico;
- **Categoria II:** Análise das classificações geomecânicas dos maciços rochosos para túneis mineiros e escavações subterrâneas. Esta categoria engloba as classificações geomecânicas dos maciços rochosos, nomeadamente, os sistemas de classificação geomecânica (RSR, RMR, Q-system, SRC), e os índices geológico-geomecânicos (RQD, GSI) e hidrogeomecânicos (HP-value), bem como a integração desta informação tendo em vista a realização da cartografia de zonamento geomecânico Figura 40;
- **Categoria III:** Informações gerais e relatórios sínteses. Esta categoria funciona como de apoio ao utilizador, tal como para consulta de tabelas classificativas, de ábacos, da bibliografia e, por fim, dos relatórios finais síntese das classificações e/ou de outras informações geotécnicas.

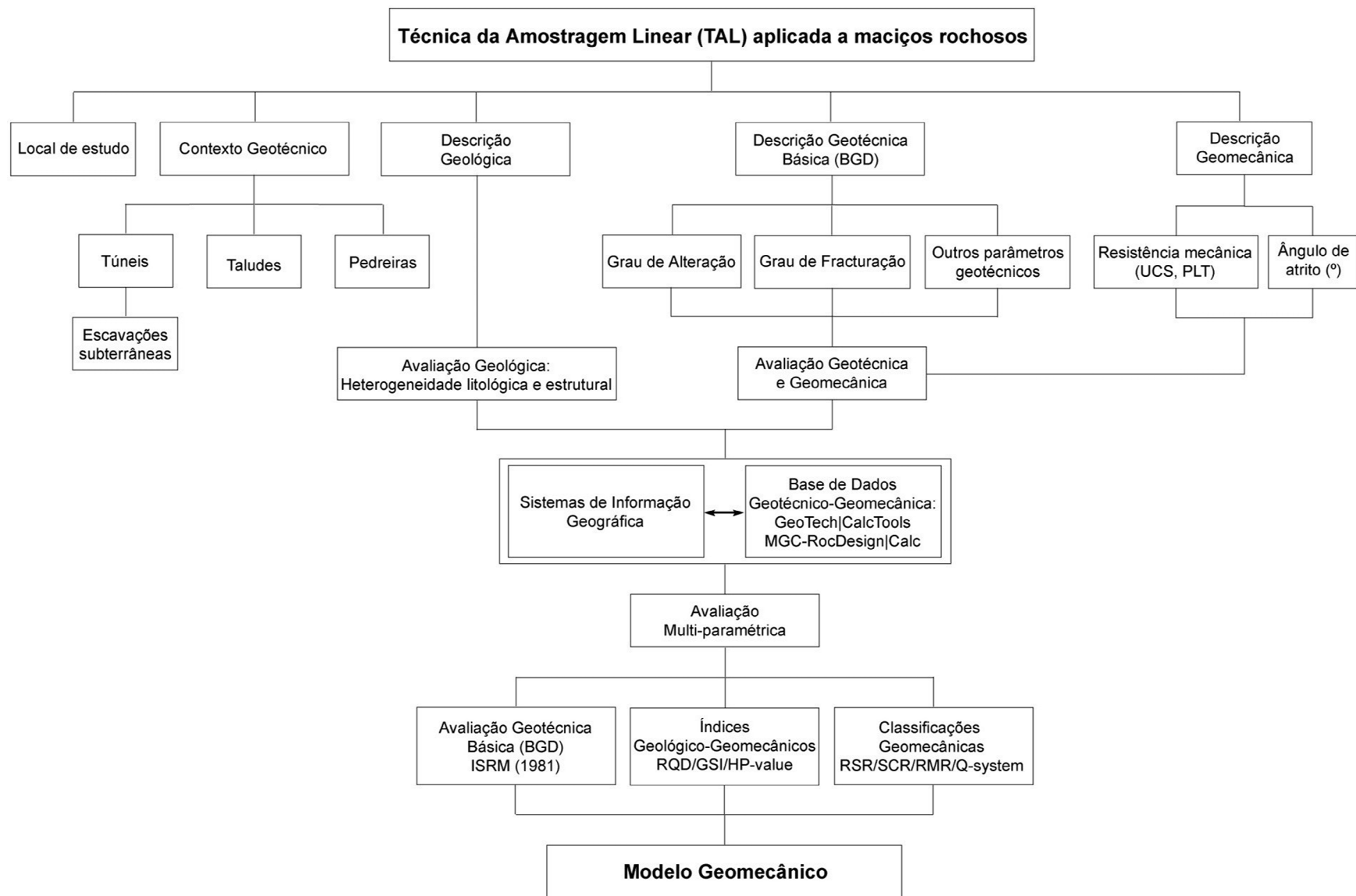


Figura 39. Fluxograma conceitual para aquisição e descrição dos dados a partir da técnica de amostragem linear até à avaliação e classificação dos maciços rochosos.

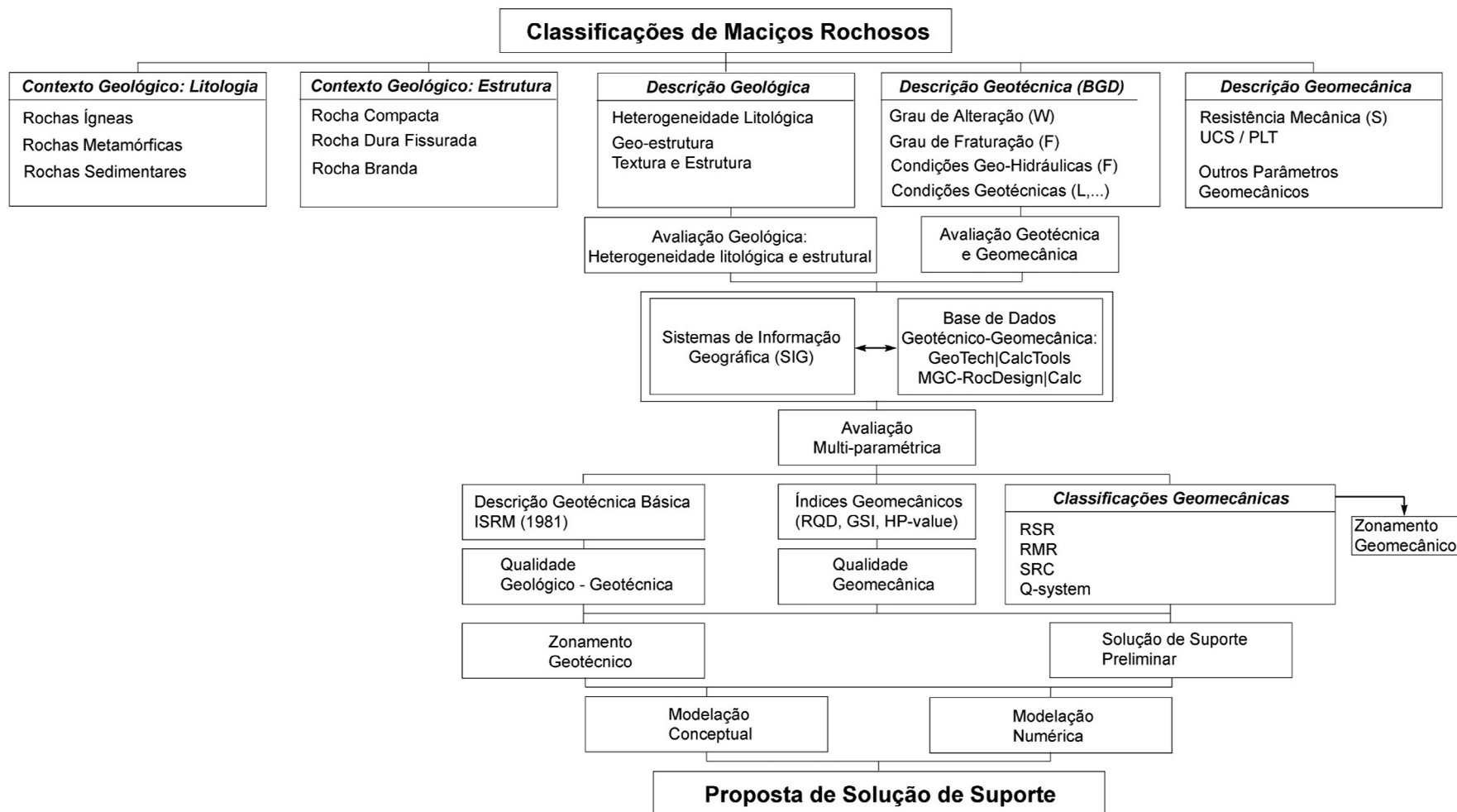


Figura 40. Fluxograma conceptual relativo à aplicação das classificações dos maciços rochosos e proposta de solução de suporte.

3.4. Anatomia da *MGC-RocDesign/Calc*

Os dados introduzidos na *MGC-RocDesign/Calc* correspondem à informação geológica, geotécnica e geomecânica de maciços rochosos independentemente do tipo de túnel ou de escavação subterrânea. Logo, a “Calculadora Geomecânica” permitirá ser usada em qualquer projeto geotécnico de engenharia de maciços rochosos.

3.5. O software

A *MGC-RocDesign/Calc* consiste numa aplicação do programa Microsoft Excel® (versão 2013) em linguagem de programação *Visual Basic for Applications – VBA*®, Figura 41. Essa programação foi executada mediante a inserção e adaptação das várias tabelas que compõem as diferentes classificações dos maciços rochosos. Foi efetuada uma tradução de todas as tabelas classificativas para português e mantiveram-se as tabelas originais em anexo, caso o utilizador necessite de consultar a fonte bibliográfica original (em inglês).

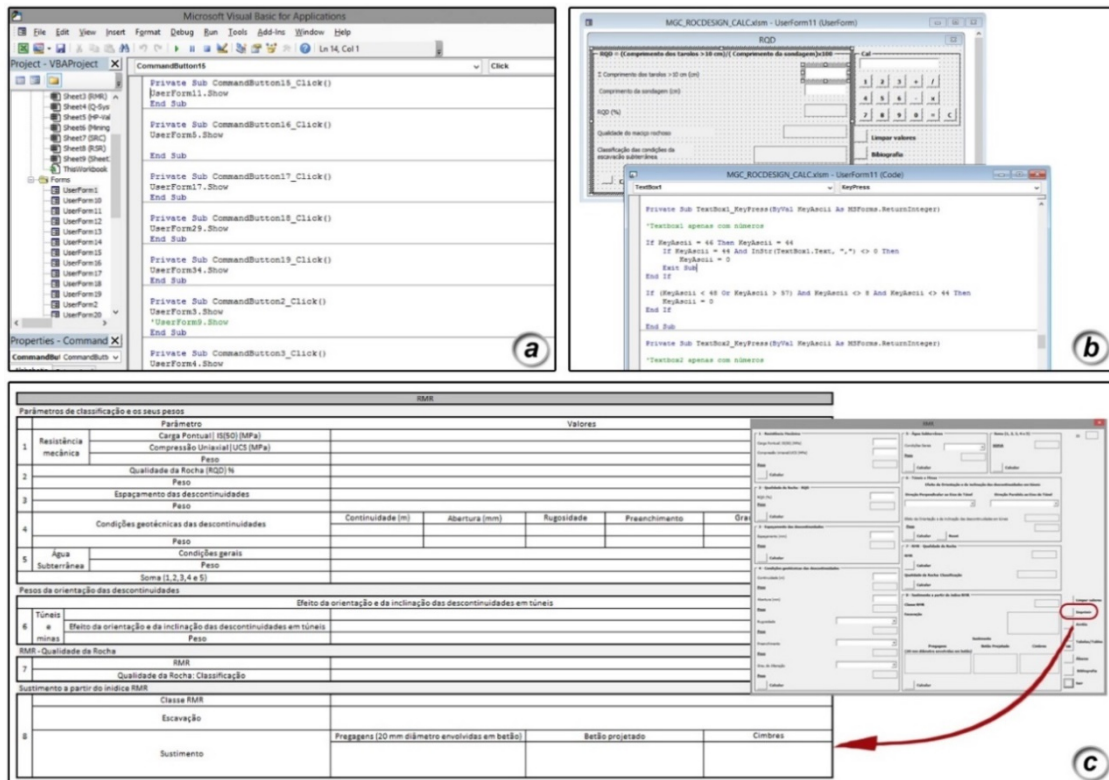


Figura 41. Esquema ilustrativo das diversas etapas da programação em VBA®: a) Linguagem tipo usada na programação da *MGC-RocDesign/Calc* no MS. Excel® e VBA®; b) Exemplo da programação de uma *textbox*; c) Exemplo de um relatório tipo gerado através dos formulários para a classificação geomecânica RMR.

Todos os dados são usados no preenchimento das folhas de cálculo de MS. Excel[®], o que permitirá ao utilizador o arquivo da informação em ficheiros e/ou proceder à sua impressão. O *software* funciona em qualquer computador com ambiente MS. Windows[®] desde que se tenha o pacote MS. Office[®] com o MS. Excel[®] instalado. Além disso, poderá ser usado em computadores portáteis (*Laptops, Notebooks*) e *Tablets*, desde que estes utilizem o sistema operativo MS. Windows[®]. No caso de se utilizar estes dispositivos ou portáteis ultra-leves tornar-se-á assim uma grande vantagem, já que os dados de campo poderão ser introduzidos diretamente durante a fase dos levantamentos geológico-geotécnicos de terreno.

Ao aceder à **MGC-RocDesign/Calc**, o utilizador depara-se, por razões de segurança, com a necessidade de introdução das suas credenciais pessoais (*user / password*) para ter acesso ao menu principal (Figura 42).

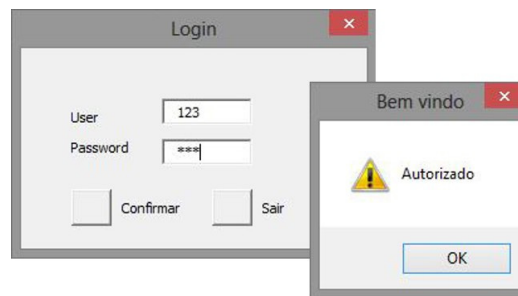


Figura 42. Acesso à **MGC-RocDesign/Calc**: introdução das credenciais pessoais.

Após o acesso à **MGC-RocDesign/Calc**, o utilizador depara-se com as seguintes opções (Figura 43):

- **I. General Classification Systems / Sistemas de Classificações Gerais:**
 - RQD
 - RSR
 - GSI
- **II. Geomechanical Classification Systems / Sistemas de Classificações Geomecânicas:**
 - RMR
 - Q-system
 - SRC
- **III. Hydrogeomechanical Classification Systems / Sistemas de Classificações Hidrogeomecânicas:**
 - HP-value
- **IV. GeoTech/CalcTools – Rock Mass Database / Bases de Dados do Maciço Rochoso:**
 - *GeoTech/CalTools (ScanGeoData|BGD / SchmidtData|UCS)*

Estas opções são as principais definidas no menu principal, uma vez que irão permitir ao utilizador migrar para outros menus onde poderá preencher ou escolher outras informações relativas a cada classificação ou informações complementares.

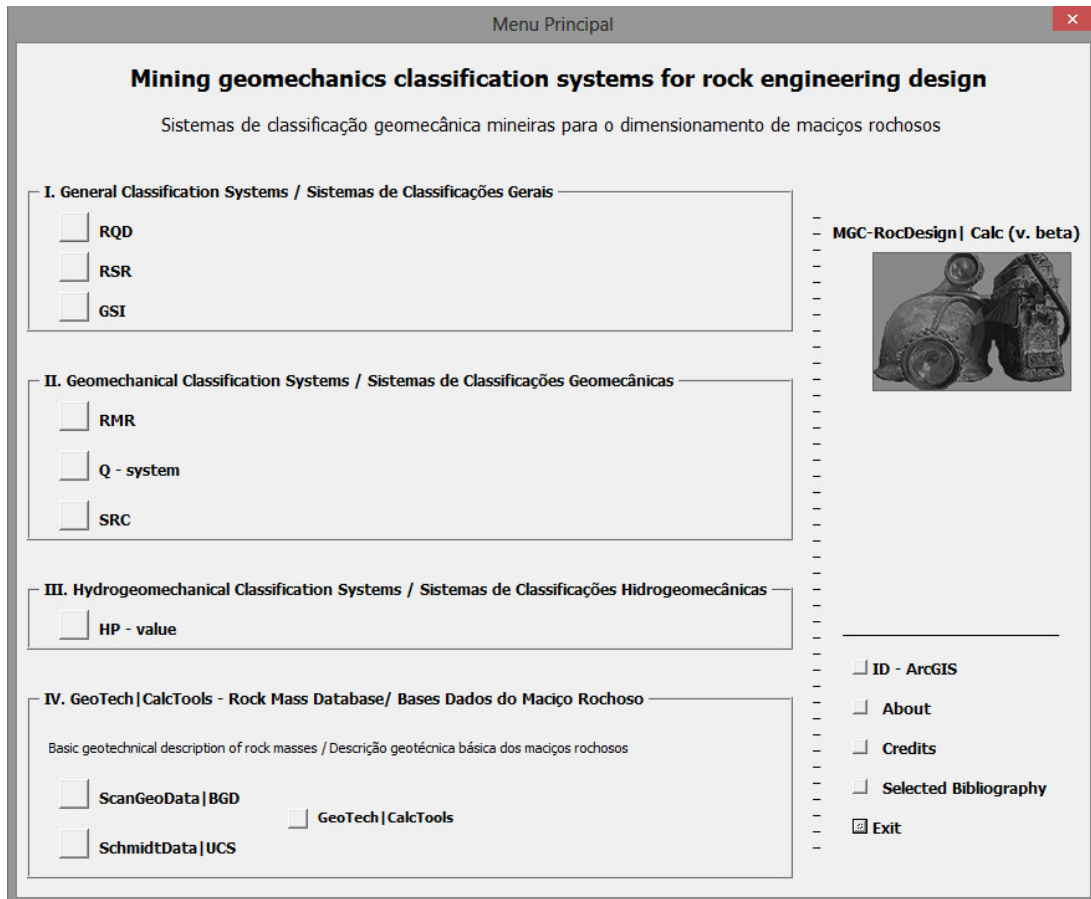


Figura 43. Apresentação do Menu Principal que permite o utilizador aceder às diferentes classificações geomecânicas.

De seguida será descrito a essência do processo construtivo do Menu Principal e as funcionalidades gerais de cada objeto por este constituído que se desdobrará em seções compostas por sub-menus. Logo, apresentar-se-á todo o processo construtivo do Menu que é constituído por rótulos (*labels*), botões de comando (*command buttons*), quadros (*frames*), caixas de imagem (*image*) e controlos de apoio (*control tip text*).

3.5.1. General Classification Systems / Sistemas de Classificações Gerais

Esta seção é constituída por um *frame* que serve de separador dos restantes objetos e por três botões de comando. Esses botões de comando fazem a ligação aos três sistemas de classificação gerais, ou seja o RQD (*Rock Quality Designation*), RSR (*Rock Structure Rating*) e o GSI (*Geological Strength Index*). Caso o utilizador necessite de saber a descrição das iniciais dos sistemas de

classificação gerais, aparecerá, ao colocar o apontador do rato por cima das iniciais, um *control tip text* com a definição do autor (ou autores) de cada sistema de classificação (Figura 44). O mesmo acontecerá para os restantes botões do Menu.

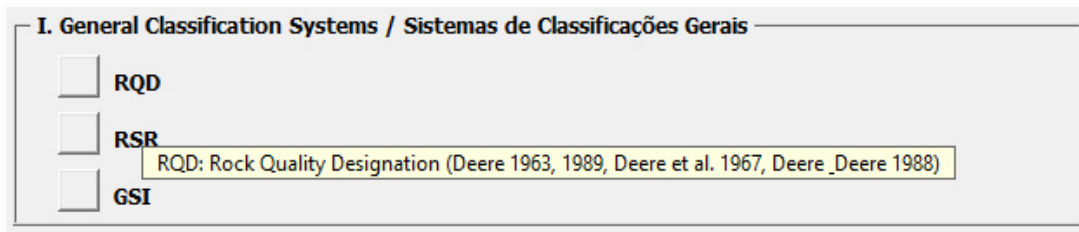


Figura 44. General Classification Systems / Sistemas de Classificações Gerais com *control tip text* ativado com o descritivo do RQD e os respetivos autores.

RQD

A janela RQD (Figura 45) é constituída pelos descritores necessários ao seu cálculo. Optou-se pela inclusão de uma calculadora numérica básica na própria janela, para facilitar as operações aritméticas relativas às determinações dos vários comprimentos dos tarolos de sondagem (> 10 cm) e, ainda, para se evitar a abertura de novas folhas de cálculo ou, até mesmo, usar uma calculadora científica de bolso. Tal como no Menu Principal, esta janela apresenta quadros (*frames*), botões de comando (*command buttons*) e ainda caixas de texto (*texto box*) que permitem que sejam introduzidos apenas valores numéricos, mesmo que o utilizador tente introduzir campos de texto não lhe será permitido a sua inserção. Logo, o valor total da soma dos tarolos > 10 cm não será apenas apresentado no visor da calculadora como também no Σ Comprimento dos tarolos > 10 cm (cm). Na *label* do RQD, aparecerá um *control tip text* que auxiliará o utilizador no intervalo de valores de RQD a serem introduzidos (Figura 45).

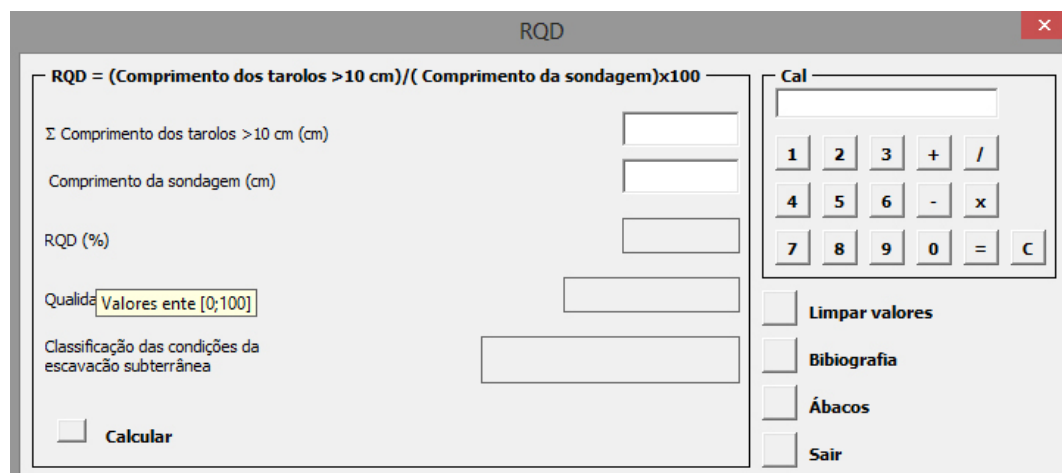


Figura 45. Apresentação da janela do Menu RQD com o *control tip text* associado.

Os botões de comando contíguos ao Menu têm as seguintes funções:

- Botão “Calcular”: permite determinar o valor do RQD; valor esse que estará associado à qualidade da rocha, bem como à classificação das condições da escavação subterrânea;
- Botão “Limpar Valores”: apagará todos os campos preenchidos;
- Botão “Bibliografia”: abrirá uma nova janela onde será listada a bibliografia principal associada ao RQD;
- Botão “Ábacos”: permitirá aceder a uma nova janela onde os ábacos do RQD poderão ser consultados; o valor do RQD pode ser calculado através da expressão do RQD ([1]) ou através de ábacos;
- Botão “Sair”: permitirá sair da janela e voltar ao Menu Principal.

RSR

Para o cálculo do RSR, este menu está dividido em três parâmetros (A, B e C) como indica a Figura 46.

O Parâmetro A (Geologia geral) é constituído essencialmente por caixas de combinação (*combo box*). Estas caixas de combinação são constituídas por diversas opções seleccionáveis, sendo apenas possível fazer uma única escolha. Ao seleccionarmos o tipo de rocha (por exemplo: Ígnea), as restantes caixas de combinação ficarão inativas, uma vez que apenas se poderá seleccionar um tipo de rocha. Não será permitido editar as caixas de combinação, o que poderia induzir erros no programa. É de notar que, no caso de engano na seleção, poder-se-á premir o botão de comando “Reset” (Figura 46) que colocará de novo todas as caixas de combinação ativas. Com todos os campos escolhidos o botão calcular permitirá atribuir um peso de acordo com a opção escolhida. Esse peso vai ser usado no cálculo final do RSR.

No Parâmetro B (Padrão da fraturação e sentido da escavação), o funcionamento é similar ao do Parâmetro A, apenas permitindo uma única opção de escolha e, como anteriormente referido, o botão *Reset* ativará todas as caixas de combinação. O botão “Calcular” atribui um determinado peso mediante a escolha que irá ser usado no cálculo do RSR. É de notar que na *label* “Inclinação das principais descontinuidades^{a)}” tem um *control tip text* que permitirá definir o intervalo do ângulo da inclinação das principais descontinuidades.

Com o Parâmetro A e B calculados, o Parâmetro C (Água Subterrânea e condições geotécnicas das descontinuidades) será então o resultado do seu somatório. É de notar que, se o somatório dos dois parâmetros anteriores for inferior ou igual a 44, esse valor será preenchido na *label* da esquerda, fazendo com que a caixa de combinação das “Condições das descontinuidades^{b)}” da

direita fique inativa. Mais uma vez aqui, apenas uma opção será permitida. Se o valor do somatório dos parâmetros A e B for superior a 44, a *label* a ser preenchida será a da direita, o que fará com que a caixa de combinação da esquerda das “Condições das descontinuidades^{b)}” fique inativa. Mais uma vez o botão “Reset”, voltará a ativar as caixas de combinação. O botão “Calcular” atribui um peso mediante as escolhas dos parâmetros.

Por fim com os pesos de todos os parâmetros o valor do RSR poderá então ser calculado, mediante o valor do RSR, podendo-se aferir a qualidade do maciço rochoso.

Na janela do Menu RSR existe uma série de botões com as seguintes funcionalidades:

- Botão “Limpar valores”: permitirá apagar todos os campos com valores;
- Botão “Imprimir”: guardará todos os campos que foram preenchidos em formato *pdf⁶, que será como uma folha de registo, e poderá também ser impressa;
- Botão “ArcGis”: este botão permitirá, através de um ID que inicialmente é atribuído, gravar os campos mais importantes, para que mais tarde através do ID possam ser introduzidos em ambiente SIG através da aplicação *ArcGis*[®] para o estabelecimento da cartografia do zonamento geomecânico ou outro tipo de análise espacial SIG;
- Botão “Tabelas/Tables”: ao premir o botão “PT”, serão abertas em pdf as tabelas auxiliares a esta classificação em Português, o mesmo se passa com o botão “UK”. As tabelas serão abertas em *pdf mas em versão inglesa;
- Botão “Ábaco”: permitirá aceder a uma nova janela com ábacos do RSR;
- Botão “Bibliografia”: como anteriormente foi descrito, permitir aceder a uma nova janela onde constará a bibliografia principal associada ao RSR;
- Botão “Sair”: permitirá sair da janela e voltar ao Menu Principal.

⁶ Adobe Portable Document Format (PDF)[®], todos os direitos reservados (<http://www.adobe.com>).

The image shows a software window titled "RSR" with a close button in the top right corner. The interface is divided into three main sections for parameter input:

- Parâmetro A: Geologia geral**
 - Tipo de Rocha (Grau de alteração)**: Includes dropdown menus for "Ígnea", "Metamórfica", and "Sedimentar".
 - Peso**: A text input field.
 - Estrutura Geológica**: A dropdown menu.
 - Tipo**: A checkbox.
 - Peso**: A text input field.
 - Buttons: "Calcular" and "Reset".
- Parâmetro C: Água Subterrânea e condições geotécnicas das descontinuidades**
 - A+B**: A text input field.
 - Buttons: "Calcular" and "Reset".
 - Fluxo de água**: "225 (L/min)/300 m de túnel".
 - Condições das descontinuidades b)**: Three dropdown menus.
 - Peso**: A text input field.
 - Buttons: "Calcular" and "Reset".
 - RSR: A+B+C**: A text input field.
 - Buttons: "Calcular" and "Reset".
 - Qualidade do maciço**: A text input field.
 - Buttons: "Calcular" and "Reset".
- Parâmetro B: Padrão da fracturação e sentido da escavação**
 - Perpendicular à escavação** and **Paralelo à escavação**: Two dropdown menus.
 - Avanço da Escavação**: A dropdown menu.
 - Espacamento médio das descontinuidades**: A dropdown menu.
 - Inclinação das principais descontinuidades (a)**: Two dropdown menus.
 - Peso**: A text input field.
 - Buttons: "Calcular" and "Reset".

On the right side of the window, there is a vertical menu with the following options:

- Limpar Valores
- Imprimir
- ArcGIS
- PT
- UK
- Tabelas/Tables
- Ábaco
- Bibliografia
- Sair

Figura 46. Apresentação da janela do Menu RSR.

GSI

O Menu da Classificação GSI foi essencialmente criado por ser um índice geomecânico muito comum e por forma a ser consultado, uma vez que a sua determinação se baseia na interpretação de ábacos. Todavia, ao nível de programação é deveras difícil a sua exequibilidade em MS. Excel[®]. Posteriormente, com a migração para outro sistema será possível obter o valor do GSI sem ser apenas pela consulta de ábacos. Estes ábacos dizem respeito aos maciços fraturados e às rochas heterogéneas metassedimentares. A Figura 47 mostra os ábacos correspondentes ao GSI. É de referir que estes se encontram em Português e em Inglês.

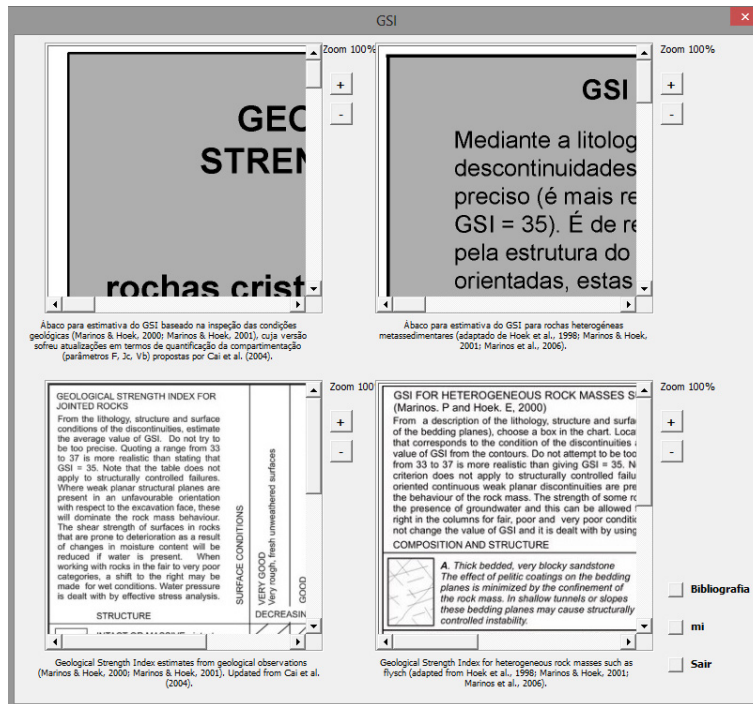


Figura 47. Ábacos referentes à classificação GSI tanto para maciços rochosos fraturados (especialmente, para “rochas ígneas ou metamórficas de alto grau”, por exemplo, rochas graníticas ou gnaisses), como para rochas heterogêneas metassedimentares (“rochas xistentas”).

Para se ter uma melhor leitura dos ábacos, cada um deles tem botões de *zoom* onde se poderá aumentar ou diminuir a imagem do ábaco. A cada imagem estão associadas *scrollbars* horizontais e verticais que se vão ajustando para se ter uma melhor perspectiva e leitura de cada um dos ábacos. A Figura 48 ilustra a perspectiva dos ábacos com mais ou menos *zoom* e com o ajuste das *scrollbars*.

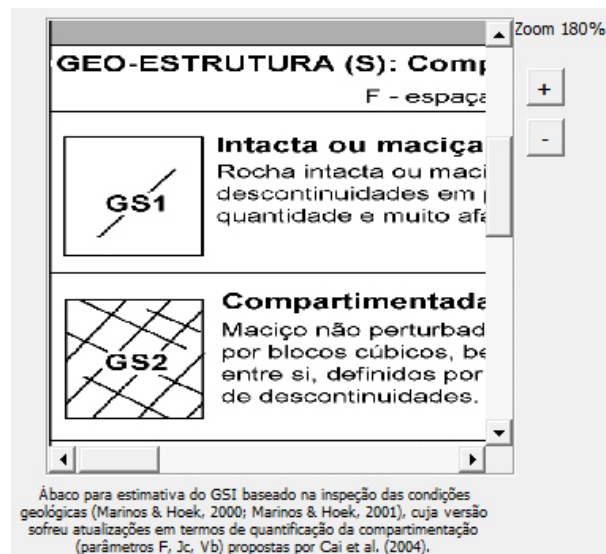


Figura 48. Perspetiva dos ábacos com mais ou menos *zoom* e com o ajuste das *scrollbars*.

Tal como nas classificações anteriores, existe uma série de botões, neste caso, o botão de comando “Bibliografia” (que abrirá uma nova janela onde consta a bibliografia selecionada sobre o GSI), o botão de comando “mi” (constante da rocha), onde abrirá uma nova janela com tabelas relativas ao valor da constante *mi*. As imagens das tabelas, tal como anteriormente, também se encontram em versão Portuguesa e versão Inglesa. Cada imagem está associada a um botão de *zoom* e de *scrollbars* horizontais e verticais para se ter uma melhor visualização de cada tabela (Figura 49).

Tabela para estimativa da constante *mi* para rocha intacta, segundo o tipo de litologia (adaptado de Marinós & Hoek, 2000; Hoek, 2007).

Rock type	Class	Group	Coarse	
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates	S
			Breccias	
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone	S
			(12 ± 3)	(1
Evaporites				
	Organic			
MORPHIC		Non Foliated	Marble	Me
			9 ± 3	

Values of the constant *mi* for intact rock, by lithological group. Note that values in parenthesis are estimates. The range of values quoted for each material depends upon the granularity and interlocking of the crystal structure – the higher values being associated with tightly interlocked and more frictional characteristics (Marinos & Hoek, 2000; Hoek, 2007)

Sair

Figura 49. Tabelas da constante *mi* na versão Portuguesa e Inglesa.

O botão de comando “Sair” do *mi* levará ao menu anterior, ou seja, à janela do GSI. Por sua vez o botão de comando “Sair” do menu GSI, aceder-se-á ao Menu Principal.

3.5.2. Geomechanical Classification Systems / Sistemas de Classificações Geomecânicas

A secção *Geomechanical Classification Systems / Sistemas de Classificações Geomecânicas* tem basicamente a mesma estrutura dos menus anteriores. É constituída por três botões de comando com ligação às seguintes classificações:

- RMR (*Rock Mass Rating*);
- Q-system (*Rock Tunnelling Quality Index*);
- SRC (*Surface Rock Mass Classification*).

A Figura 50 ilustra os três botões das classificações, estando associado a cada uma delas um *control tip text* que mostra os autores das classificações.

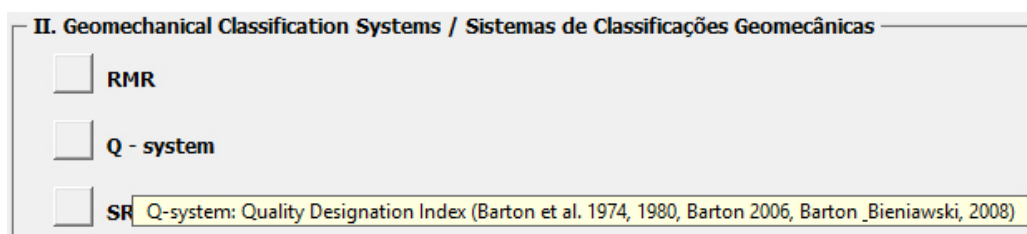


Figura 50. Geomechanical Classification Systems / Sistemas de Classificações Geomecânicas com *control tip text* com a descrição do Q-system e os respetivos autores.

RMR

A classificação RMR engloba nove pontos sendo um deles o somatório dos cinco primeiros pontos (Figura 51). Cada ponto está incorporado em *frames* distintos. Serão então apresentados os diferentes pontos:

- 1 - Resistência Mecânica;
- 2 - Qualidade da Rocha – RQD;
- 3 - Espaçamento das descontinuidades;
- 4 - Condições geotécnicas das descontinuidades;
- 5 - Água Subterrânea:
[Soma dos pesos 1,2,3,4 e 5]
- 6 - Túneis e Minas;
- 7 - RMR – Qualidade da Rocha;
- 8 - Sustimento a partir do índice RMR.

The image shows a software window titled "RMR" with a close button in the top right corner. The interface is divided into several sections for data entry and calculation:

- 1 - Resistência Mecânica:** Fields for "Carga Pontual|IS(50) (MPa)", "Compressão Uniaxial|UCS (MPa)", and "Peso". A "Calcular" button is present.
- 2 - Qualidade da Rocha - RQD:** Fields for "RQD (%)" and "Peso". A "Calcular" button is present.
- 3 - Espaçamento das descontinuidades:** Fields for "Espaçamento (mm)" and "Peso". A "Calcular" button is present.
- 4 - Condições geotécnicas das descontinuidades:** Fields for "Continuidade (m)", "Abertura (mm)", "Rugosidade", "Preenchimento", and "Grau de Alteração". Each has a "Peso" field and a "Calcular" button.
- 5 - Água Subterrânea:** Fields for "Condições Gerais", "Peso", and "Soma (1, 2, 3, 4 e 5)". A "Calcular" button is present.
- 6 - Túneis e Minas:** Fields for "Direção Perpendicular ao Eixo do Túnel", "Direção Paralela ao Eixo do Túnel", "Efeito da Orientação e da inclinação das descontinuidades em túneis", and "Peso". "Calcular" and "Reset" buttons are present.
- 7 - RMR - Qualidade da Rocha:** Fields for "RMR" and "Qualidade da Rocha: Classificação". "Calcular" buttons are present.
- 8 - Sustentamento a partir do índice RMR:** Fields for "Classe RMR" and "Escavação". A "Calcular" button is present.

On the right side, there is a vertical menu with buttons: "Limpar valores", "Imprimir", "ArcGis", "PT", "Tabelas/Tables", "UK", "Ábacos", "Bibliografia", and "Sair".

Figura 51. Apresentação da janela do Menu RMR.

Como anteriormente foi demonstrado (ver RSR), para se ter uma relação de valores coerentes, exemplificando o *frame 1* – Resistência Mecânica (Carga Pontual|IS₍₅₀₎ (MPa) e Compressão Uniaxial|UCS (MPa)), a cada um destes parâmetros está associado um *control tip text* que mais uma vez ajuda na atribuição do intervalo de valores a inserir. Os valores das Resistências de Carga Pontual e de Compressão Uniaxial têm que estar na mesma gama de valores para um dado peso ser atribuído. Esses valores podem ser consultados nas tabelas de apoio. Os parâmetros a que estejam associados intervalos de valores aparece um *control tip text* com o intervalo de valores a ser introduzido.

Uma vez mais a classificação RMR tem botões de comando com as mesmas características da classificação RSR (botão “Limpar valores”, botão “Imprimir”, botão “ArcGis”,...).

Q-system

A janela do Q-system, tal como a classificação anterior está dividida por *frames*. Os *frames* apresentados são os seguintes:

1. Qualidade da Rocha-RQD (engloba o Número de Famílias de Descontinuidades- J_n);
2. Índice de Rugosidade- J_r ;
3. Índice de Alteração das Descontinuidades- J_a ;
4. Fator de redução do caudal de água- J_w ;
5. Estado de Tensão do Maciço-SRF;
6. Q-system que apresenta a fórmula de cálculo do valor do Q.

A Figura 52 apresenta o aspeto geral do menu da classificação Q-system.

The screenshot shows the 'Q-System' software interface, which is divided into five main frames for data entry and calculation. Each frame includes a title, input fields, and a 'Calcular' button. Frame 1 (Quality of Rock - RQD) includes fields for RQD (%) and the number of discontinuity families (J_n). Frame 2 (Roughness Index - J_r) includes three options for contact between rock walls, with a 'Peso' field and 'Calcular' and 'Reset' buttons. Frame 3 (Alteration Index - J_a) also includes three contact options, a 'Peso' field, and 'Calcular' and 'Reset' buttons. Frame 4 (Water Flow Reduction Factor - J_w) includes a dropdown menu, a 'Peso' field, and a 'Calcular' button. Frame 5 (Mass Stress State - SRF) includes four options for rock conditions, with associated stress ratio fields (σ_c / σ_1 , σ_1 / σ_1 , σ_c / σ_1) and 'Calcular' and 'Reset' buttons. At the bottom, there is a formula display: $Q\text{-System} = (RQD/J_n) \times (J_r/J_a) \times (J_w/SRF)$. Below the formula are fields for 'Q' and 'Classificação', each with a 'Calcular' button. On the right side, there are buttons for 'Limpar valores', 'Imprimir', 'ArcGis', 'Bibliografia', 'PT', 'UK', 'Ábacos', and 'Sair', along with a 'Tabelas/Tables' button.

Figura 52. Apresentação da janela da classificação Q-system.

É de notar, que, tal como anteriormente, as caixas de combinação apenas permitem uma única escolha; as restantes ficam, de imediato, inativas para não haver o risco de fazer mais que uma seleção. Esta classificação tem os restantes botões de comando similares às classificações anteriores (botão “Limpar valores”, botão “Imprimir”, botão “ArcGis”, ...). No *frame* Q-system existe um botão (ESR) que ao premir abre as tabelas referentes a este parâmetro.

SRC

O menu da classificação SRC está dividido nos seguintes *frames* (Figura 53):

- 1-Resistência Mecânica;
- 2-Grau de Fraturação;
- 3-Condições Geotécnicas das Descontinuidades;
- 4-Água Subterrânea;
- 5-Estado de tensão;
- [Soma: dos pesos dos *frames* 1,2,3,4 e 5]
- SRC (classificação do maciço).

Figura 53. Apresentação da janela da classificação SRC.

Os critérios de introdução dos valores são iguais aos das restantes classificações, aparecendo igualmente *control tip text* com os intervalos de valores a serem introduzidos, bem como os restantes botões (botão “Limpar valores”, botão “Imprimir”, botão “ArcGis”, ...).

3.5.3. *Hydrogeomechanical Classification Systems/Sistemas de Classificações Hidrogeomecânicas*

Esta seção é apenas composta pela classificação HP-value por ser a mais fiável e completa em termos de estudos de infiltrações de água subterrânea nas escavações em rocha. A Figura 54 ilustra a composição da *Hydrogeomechanical Classification Systems/Sistemas de Classificações Hidrogeomecânicas*.

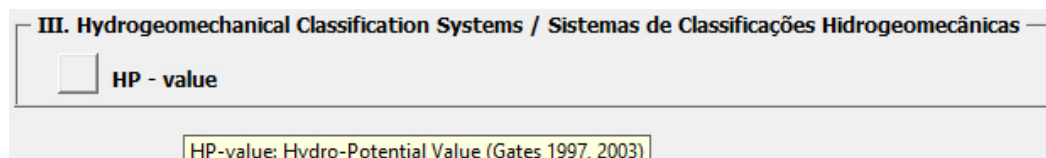


Figura 54. Hydrogeomechanical Classification Systems/Sistemas de Classificações Hidrogeomecânicas com control tip text com a descrição do HP-value e os respetivos autores.

HP-value

O menu da classificação HP-value está dividido nos seguintes *frames*, como se poderá observar na Figura 55:

- 1 - Qualidade da Rocha-RQD (engloba o Número de Famílias de Descontinuidades- J_n);
- 2 - Índice de Rugosidade- J_r ;
- 3 - Abertura e forma das descontinuidades- J_{af} ;
- 4 - Condutividade hidráulica das descontinuidades- J_k ;
- 5 - Percolação de água nas descontinuidades- J_w ;
- HP: fórmula de cálculo do valor HP-value.

Os critérios de introdução dos valores são iguais aos das restantes classificações, aparecendo igualmente *control tip text* com os intervalos de valores a serem introduzidos, a inatividade das caixas de combinação, bem como os restantes botões (botão “Limpar valores”, botão “Imprimir”, botão “ArcGis”, ...).

Figura 55 Apresentação da janela da classificação HP-value.

3.5.4. GeoTech|CalcTools - Rock Mass Database / Bases de Dados do Maciço Rochoso

Nesta seção está presente a descrição geotécnica básica dos maciços rochosos, funcionando como a base de dados do maciço rochoso em termos de compilação dos dados de campo de caracterização geológica, geotécnica e geomecânica (CFCHF 1996, ISRM 2007). A descrição e a avaliação relativa à entidade fundamental das “Descontinuidades” e os parâmetros fundamentais e basilares para serem utilizados e cruzados aquando da análise das classificações e índices geomecânicos (Figura 57). A Figura 56 ilustra a *GeoTech|CalcTools - Rock Mass Database/Bases de Dados do Maciço Rochoso*. Esta ferramenta é constituída por duas bases de dados dinâmicas autónomas: a *ScanGeoData|BGD* e a *SchmidtData|UCS* (Fonseca et al. 2010, Galiza et al 2011a,b,c).

Figura 56. *GeoTech|CalcTools - Rock Mass Database/Bases de Dados do Maciço Rochoso*.

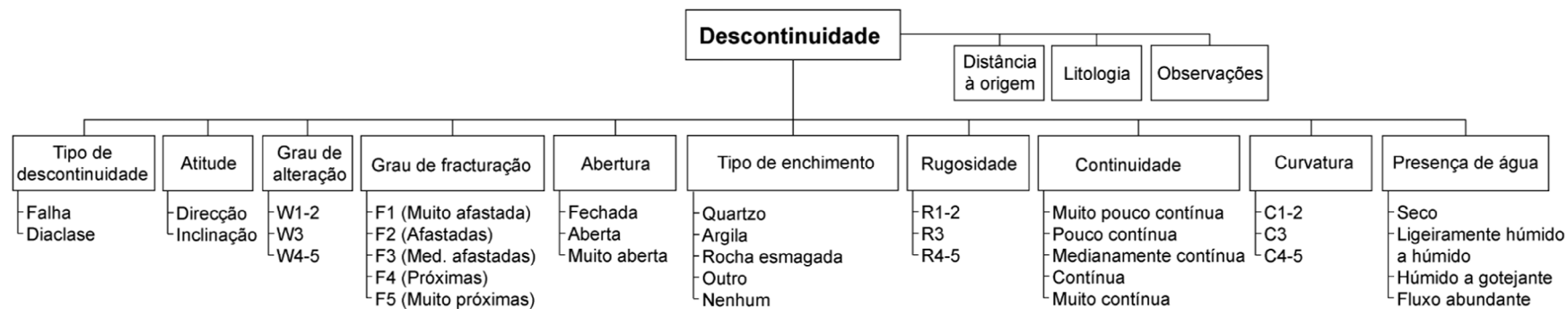


Figura 57. Fluxograma conceptual relativo à aquisição de dados do maciço rochoso: Entidade fundamental “Descontinuidade”.

ScanGeoData|BGD

A *ScanGeoData|BGD* (Figura 58) não está associada a nenhum formulário, uma vez que é uma aplicação desenvolvida em folha de cálculo MS. Excel[®] e não em linguagem VBA[®]. O botão de comando “ScanGeoData|BGD” faz com que seja possível descarregar a folha de cálculo da base dinâmica. Os restantes botões que estão presentes nesta janela têm a mesma função que os botões anteriores com o mesmo nome.

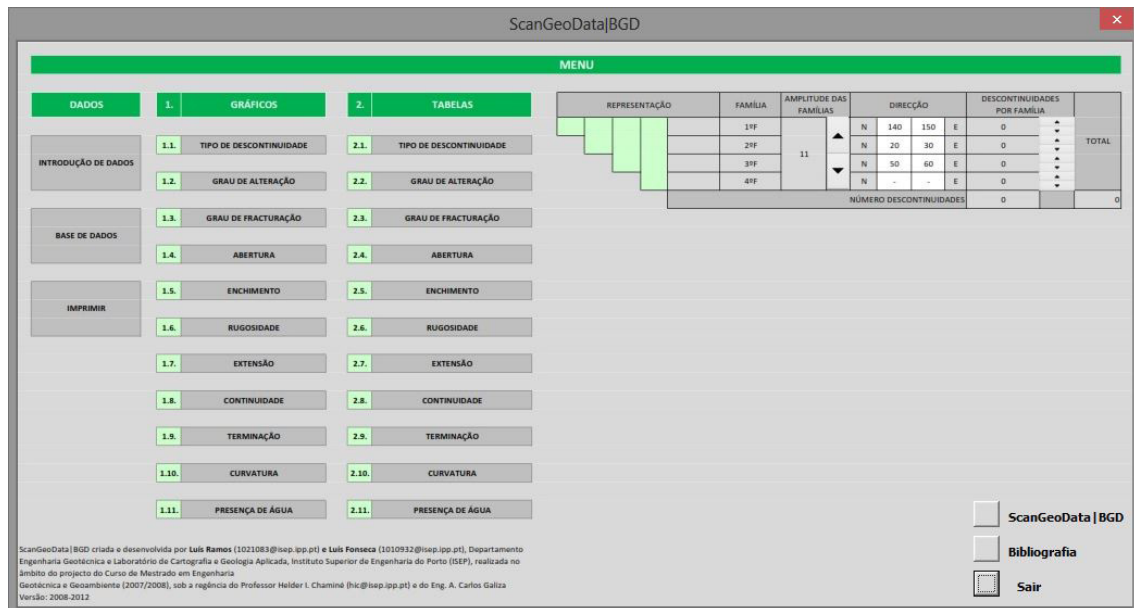


Figura 58. Apresentação da janela do menu da *ScanGeoData|BGD* (adaptado de Fonseca 2008, Ramos 2008 e Galiza 2013).

SchmidtData|UCS

Tal como a anterior, a *SchmidtData|UCS* está igualmente associada a uma folha de cálculo MS. Excel[®] autónoma. De igual modo, o botão de comando “SchmidtData|UCS”, descarrega a folha de cálculo em que esta está presente. A Figura 59 apresenta a constituição da janela da *SchmidtData|UCS*. Os restantes botões que constituem esta janela têm a funcionalidade dos que foram apresentados anteriormente (especialmente o botão de comando “GeoTech|CalcTools” que reporta a bibliografia principal subjacente à organização da informação relativa à *Rock Mass Database/Bases de Dados do Maciço Rochoso*).

The screenshot shows the SchmidtData|UCS software interface. It features a main data entry table with columns for:

- ENTREGA IDENTIFICADORA MÓDULO**
- DISTÂNCIA À ORIENTAÇÃO (metros)**
- UTILIZADOR**
- ATIVIDADE** (with sub-columns for Direction and Inclination)
- GRAU DE ALTERAÇÃO (SIEM, 1979, 1981, GSI, 1985)** (with sub-columns W₁, W₂, W₃, W₄)
- ORIENTAÇÃO DO MARTELO SCHMIDT (º)** (with sub-columns 1-10)
- VALOR DO ENFIMO DE FRATURAS (RESSALTO, ABRAVADO, R)**
- CINCO MAIORES VALORES DO RESSALTO, R (segundo a norma proposta pela GSI, 1979, 1981, 1987, 2007; ASTM, 2007)**
- RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAIXIAL, UCS (MPa)**
- CLASSE DE RESISTÊNCIA (SIEM, 1983)** (with sub-columns f₁, f₂, f₃, f₄, f₅)
- OBSERVAÇÕES**

 The table contains one row of data with values such as 42.0, 53.0, 36.0, 42.0, 44.0, 39.0, 34.0, 43.0, 44.0, 48.0, 53.0, 48.0, 44.0, 44.0, 43.0, 163.3, 124.9, 100.8, 100.8, 95.3, 117.1, X, and 2.

Figura 59. Apresentação da janela do menu da base de dados dinâmica *SchmidtData|UCS* (adaptado de Fonseca 2008, Ramos 2008 e Galiza 2013).

3.5.5. Outros botões de comando

O menu da *MGC-RocDesign|Calc* apresenta outros botões associados, ou seja, serão botões de auxílio ou informação para o utilizador. A Figura 60 ilustra a disposição dos botões. Os botões presentes são os seguintes:

- Botão “ID-ArcGis”;
- Botão “About”;
- Botão “Credits”;
- Botão “Selected Bibliography”;
- Botão “Exit”.

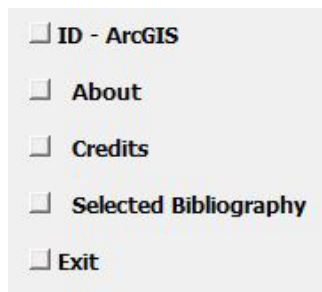


Figura 60. Disposição dos botões de informação geral e complementar ao utilizador.

De seguida será efetuado um breve resumo às funcionalidades de cada um dos botões anteriormente citados. O botão “ID-ArcGis”, estabelece uma identificação (ID) para que os parâmetros das classificações possam ser introduzidas em ambiente SIG no ArcGis. O ID estará associada a cada uma das classificações. Ao premir o botão aparecerá uma janela para que seja introduzido um determinado ID, e de seguida, carregando no OK, aparecerá uma mensagem a alertar que o ID foi introduzido. A Figura 61 ilustra as características do botão “ID”.

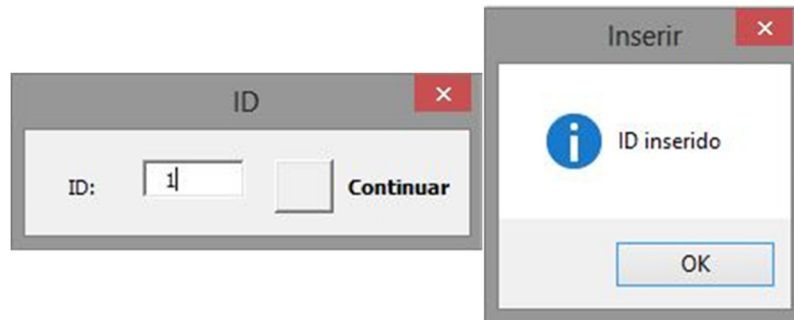


Figura 61. Figura ilustrativa das opções do botão ID.

Ao premir o botão “About” (Figura 62) abre-se uma pequena janela com toda a informação relativa à **MGC-RocDesign|Calc**. Apresenta a versão da mesma, data de criação e contatos relativos aos criadores da calculadora. A imagem seguinte ilustra de melhor forma toda a informação da **MGC-RocDesign|Calc**. O botão “Sair”, encerra a janela e regressa-se ao menu principal.

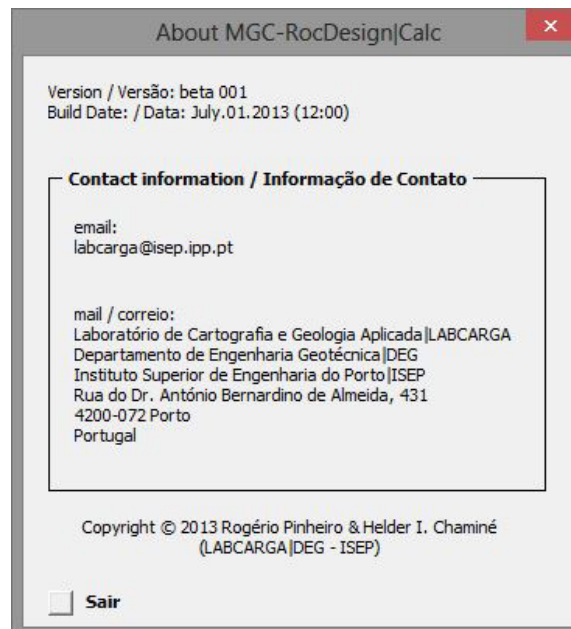


Figura 62. Informação genérica sobre a **MGC-RocDesign|Calc**, onde se poderá encontrar a morada para contatos futuros.

O botão “Credits” refere-se ao âmbito em que foi elaborada a **MGC-RocDesign|Calc**, tendo ainda uma breve advertência focalizada nos autores das diversas classificações geomecânicas e nos programas informáticos utilizados (Figura 63).



Figura 63. Apresentação da janela do menu *Credits*.

O botão “Selected Bibliography” apresenta a bibliografia principal que foi utilizada como auxílio à fundamentação científica da “Calculadora Geomecânica” e pretende, igualmente, constituir uma fonte de informação para o potencial utilizador. A bibliografia está dividida por temáticas diversas, desde os manuais de geoenharia de referência até aos manuais sobre as classificações de engenharia de maciços rochosos, passando pelas principais publicações de geociências de engenharia, mecânica das rochas e códigos/recomendações/ensaios em engenharia de maciços rochosos. Como se poderá observar na Figura 64, ao selecionar o botão “Geoengineering issues”, abrir-se-á de imediato um menu com a bibliografia relacionada com o tema.

Para terminar, basta premir o botão “Exit”, o qual encerrará o programa **MGC-RocDesign|Calc**.

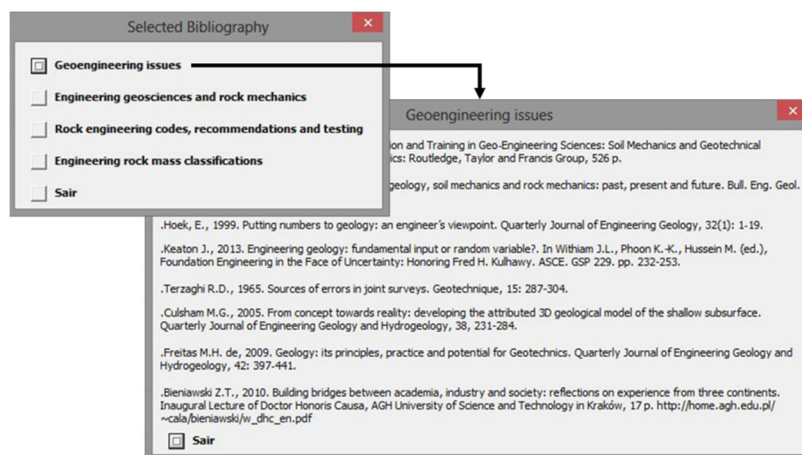


Figura 64. Ilustração do botão “Geoengineering issues” e da bibliografia associada.

**Capítulo 4 – Exemplos de aplicação prática da
MGC-RocDesign | Calc: comparações,
limitações e potencialidades**

4. Exemplos de aplicação prática da **MGC-RocDesign|Calc**: comparações, limitações e potencialidades

*“The output from any rock mass classification is only as good as the input data. It is therefore important that the necessary basic input data are available and reliable.”
(Bieniawski 1993)*

4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo apresentar-se-á de forma ilustrativa um exemplo de aplicabilidade da “Calculadora Geomecânica” **MGC-RocDesign|Calc**. Na seleção do exemplo teve-se em linha de conta uma série de pressupostos, a saber: i) bom conhecimento pessoal da área da investigação, neste caso da antiga mina das Aveleiras (Tibães), visto ter tido participação efetiva em trabalhos de cartografia subterrânea durante os anos 2012/2013, a convite do orientador da presente dissertação; ii) o local selecionado apresenta um excelente repositório com estudos geotécnicos de terreno e de laboratório, de documentação histórica e de publicações sobre a temática em apreço (e.g., LABCARGA 2007-2008, Lopes et al. 2008, Meixedo et al. 2011, Pereira 2012, Lopes 2012, Trigo et al. 2013); iii) no caso específico da geomecânica mineira foram realizados estudos no maciço rochoso da mina das Aveleiras/Tibães o que permitirá com alguma segurança balizar os resultados alcançados com recurso à aplicação informática desenvolvida, a **MGC-RocDesign|Calc**; iv) será ensaiada uma comparação objetiva entre uma abordagem clássica, que incluirá, com certeza, muitas tarefas manuais na utilização de tabelas classificativas, e a utilização da ferramenta **MGC-RocDesign|Calc** com recurso a todas as funcionalidades e processos automáticos inerentes a uma “Calculadora” computacional. Esta comparação visará, igualmente, a oportunidade de se sistematizarem as eventuais limitações, potencialidades e trabalhos futuros para o melhoramento da **MGC-RocDesign|Calc**.

O presente capítulo organizou-se de forma a apresentar e a discutir a aplicabilidade da **MGC-RocDesign|Calc**. Assim, na primeira parte apresentar-se-á de forma muito breve o quadro histórico, cartográfico, geológico, geomineiro e geotécnico da mina das Aveleiras/Tibães (para o efeito, nesse tópico o texto segue de perto a publicação, de que somos co-autores, da revista “Boletim de Minas” (DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia); Trigo et al. 2013).

Seguidamente, proceder-se-á à avaliação geotécnica e geomecânica da galeria mineira 2 das Aveleiras, composta por um maciço rochoso metassedimentar e granítico (logo, heterógeno) e muito deformado e fraturado (anisotrópico); por fim, far-se-á uma comparação crítica da funcionalidade da

utilização da **MGC-RocDesign/Calc** com um duplo-objetivo, o apoio à cartografia de zonamento geomecânico e o dimensionamento do suporte.

A Figura 65 ilustra esquematicamente a caracterização dos maciços rochosos e a utilização das classificações geomecânicas em engenharia de maciços rochosos, no apoio ao dimensionamento em escavações subterrâneas ou túneis mineiros.

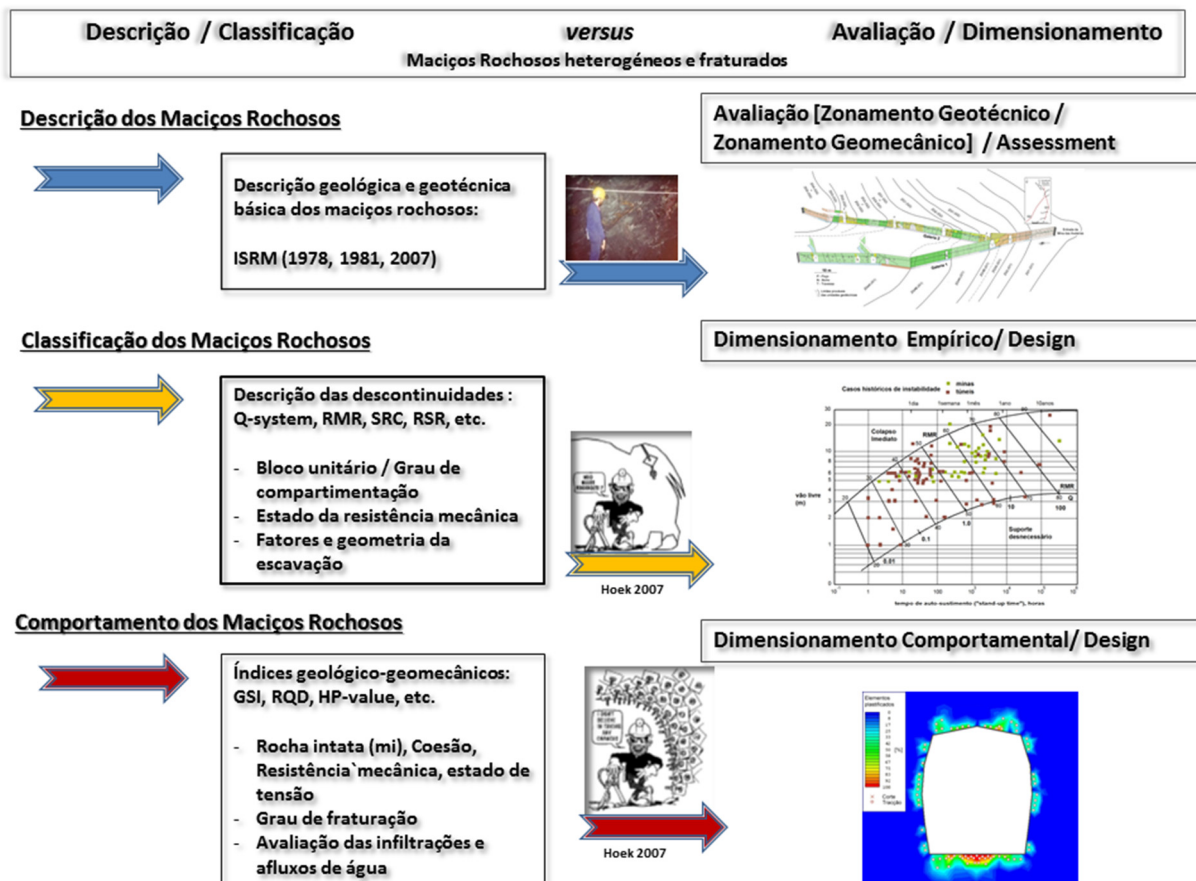


Figura 65. Ilustração esquemática de síntese sobre a caracterização dos maciços rochosos e a utilização das classificações geomecânicas em engenharia de maciços rochosos, no dimensionamento/Design de escavações subterrâneas ou túneis mineiros. (inspirado em Chaminé 2010).

4.2. A antiga mina de volfrâmio das Azeleiras (Tibães): exemplo de um maciço rochoso heterogéneo fraturado

4.2.1. Breve introdução

À semelhança do que aconteceu um pouco por todo o Noroeste Peninsular, também Mire de Tibães, em Braga, acolheu uma efémera, porém marcante, experiência de exploração mineira, quando, nos albores das duas grandes guerras mundiais, um punhado de Nortenhos se deu conta de que a fertilidade dos solos do vale do Cávado não era a única riqueza que poderia ser extraída do seu substrato. Neste caso trataram-se de explorações de pequena dimensão, algumas delas mesmo furtivas ou ocasionais, que se ocupavam da pesquisa do minério “negro”. A mina das Azeleiras, escavada no dealbar do século XVII para o fornecimento de água ao Mosteiro de S. Martinho de Tibães, foi objecto de lavra mineira e intensa exploração de volfrâmio em meados do século passado, por um período temporal de cerca 20 anos (Meixedo et al. 2011, Lopes 2012, Trigo et al. 2013).

No dealbar do século XX, o substrato rochoso do monte de S. Gens (actualmente, S. Filipe), em Mire de Tibães, é calcorreado por aventureiros e pesquisadores de volfrâmio e, em especial, nos finais dos anos 30, motivado pelas cotações excepcionais deste minério no período da Segunda Grande Guerra Mundial (e.g., Nogueira 1941, Farinas de Almeida 1946, Martinez de Lima 1953, Simões Cortez 1965). É uma de muitas explorações mineiras de volfrâmio da região Norte de Portugal (Figura 66) com todas as implicações sócio-económicas a nível nacional (e.g., Nogueira 1941, Farinas de Almeida 1946, Freire 2001, Nunes, 2001/2002, Lage 2002, Vilar 2008, Avelãs 2010) e, mesmo, a nível internacional (e.g., Li & Wang 1943, Nash 1993, Lassner & Schubert 2005). Os principais minérios extraídos na região foram o volfrâmio e o estanho, contidos em filões hidrotermais quartzosos e em filões aplito-pegmatíticos, respectivamente, com controlo tectónico (e.g., Coteló Neiva 1944, Conde et al. 1971, Teixeira et al. 1973, Ribeiro & Pereira 1982, Leal Gomes & Gaspar 1992).

"Minas de Tibães: Prosseguem com grande actividade os trabalhos de pesquisa nas minas de wolfram ultimamente registadas pelos Srs. Herculano de Matos Braga, inspector de finanças, deste distrito, Manuel Joaquim de Paiva, estimado farmacêutico desta cidade e Luís Augusto Correia da Cunha, abastado capitalista."

Transcrição de texto publicado no Jornal "Comercio do Minho" a 22 de Junho de 1916

Comercio do Porto
Terça-feira, 9 de Setembro de 1941

REPUBLICA PORTUGUESA
MINISTÉRIO DA ECONOMIA
Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos
Praça do Comércio — LISBOA

ÉDITOS DE CONCESSÃO

Faz-se público nos termos e para os efeitos do artigo 31.º do Decreto-lei n.º 18.713, de 1 de Agosto de 1930, que Silva, Barbosa & Marques, Limitada, sociedade por cotas, requereu a concessão da mina de volfrâmio denominada «Tibães» (registro denominado Lugar do Anjo), situada na freguesia de Mire de Tibães, concelho e distrito de Braga, registada na Câmara Municipal do referido concelho em 20 de Janeiro de 1940, e convidam-se todas as pessoas a quem a citada concessão possa prejudicar, a apresentar as suas reclamações no Ministério da Economia, dentro do prazo de sessenta dias, contados da data da publicação deste édito no «Diário do Governo».

Repertação de Minas, 2 de Setembro de 1941.
O Engenheiro-Chefe da Repertação.
António de Castello Branco

Terça-feira, 9 de Setembro de 1941
Diário do Minho

Éditos de Concessão

Faz-se público nos termos e para os efeitos do artigo 31.º do Decreto-lei n.º 18.713, de 1 de Agosto de 1930, que Silva, Barbosa & Marques, Limitada, sociedade por cotas, requereu a concessão da mina de volfrâmio denominada «Tibães» (registro denominado Lugar do Anjo), situada na freguesia de Mire de Tibães, concelho e distrito de Braga, registada na Câmara Municipal do referido concelho em 20 de Janeiro de 1940, e convidam-se todas as pessoas a quem a citada concessão possa prejudicar, a apresentar as suas reclamações no Ministério da Economia, dentro do prazo de sessenta dias, contados da data da publicação deste édito no Diário do Governo. Repertação de Minas, 2 de Setembro de 1941, O Engenheiro Chefe da Repertação,
Eng.º António de Castello Branco

DIÁRIO DA MANHÃ
11 - IX - 1941

RE-PUBLICA PORTUGUESA
MINISTÉRIO DA ECONOMIA
Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos
Praça do Comércio—LISBOA

Éditos de Concessão

Faz-se público nos termos e para os efeitos do artigo 31.º do Decreto-lei n.º 18.713, de 1 de Agosto de 1930, que Silva, Barbosa & Marques, Limitada, sociedade por cotas, requereu a concessão da mina de volfrâmio denominada «Tibães» (registro denominado Lugar do Anjo), situada na freguesia de Mire de Tibães, concelho e distrito de Braga, registada na Câmara Municipal do referido concelho em 20 de Janeiro de 1940, e convidam-se todas as pessoas a quem a citada concessão possa prejudicar, a apresentar as suas reclamações no Ministério da Economia, dentro do prazo de sessenta dias, contados da data da publicação deste édito no «Diário do Governo».

Repertação de Minas, 2 de Setembro de 1941.
O Engenheiro Chefe da Repertação
António de Castello Branco

Éditos de concessão dados à estampa no "Comércio do Porto" (9/09/1941), no "Diário do Minho" (9/09/1941) e no "Diário da Manhã" (11/09/1941).

Figura 66. Notícias sobre os trabalhos de pesquisa de volfrâmio na região de Mire de Tibães e sobre a exploração de volfrâmio de "Tibães" (ou Aveliras) dadas à estampa em jornais da época: i) sobre as "Minas de Tibães" no "Comercio do Minho" (22/06/1916); ii) dos éditos de concessão no "Comércio do Porto" (9/09/1941), no "Diário do Minho" (9/09/1941) e no "Diário da Manhã" (11/09/1941). In: Lopes (2012).

O Mosteiro de S. Martinho de Tibães situa-se na região Norte de Portugal, próximo da cidade de Braga. Fundado em finais do século XI, este Mosteiro conheceu épocas em que assumiu uma grande importância no contexto nacional, tendo chegado a ser a Casa-Mãe da Congregação Beneditina portuguesa (e.g., Oliveira 1974, Mata et al. 2000, Mata & Oliveira 2004, Fontes 2005, Coelho Dias 2010). A esse apogeu seguiu-se um período de decadência que culminou com a sua compra pelo Estado Português, encontrando-se, atualmente, afeto à Direção Regional de Cultura do Norte do Ministério da Cultura e classificado como Imóvel de Interesse Público desde 1944 (Mata & Oliveira 2004). Uma das razões decisivas para a escolha do local de implantação dos mosteiros era a existência de água, elemento também presente, de forma abundante, no Mosteiro de Tibães e área envolvente. O Mosteiro era abastecido por uma série de minas de água, cuja idade secular se

encontra registada em várias referências nos arquivos do Mosteiro de Tibães (Mata & Dias Costa 1998a,b, Dias Costa 2002, Coelho Dias, 2010, Martins et al. 2012, Lopes 2012). Apresenta ainda nascentes singulares, tal como a fonte de S. Bento (também conhecida por fonte de S. Bentinho), (Almeida & Almeida 1988, TERMARED 2011). A generalidade destas minas é constituída por galerias de pequenas dimensões. A mina das Aveleiras constitui uma exceção, com as galerias principais de maior dimensão, uma vez que nesta foi explorado o volfrâmio, durante a Segunda Guerra Mundial (Lopes et al. 2008, Meixedo et al. 2011, Lopes 2012). No âmbito das atividades de extensão cultural e científica que atualmente oferece, é objetivo do Mosteiro de Tibães viabilizar, futuramente, a visita à mina das Aveleiras, criando um novo motivo de interesse. Para a concretização desta intenção, tornou-se imperativo averiguar a estabilidade da mina e a necessidade de a reforçar, tendo-se selecionado um tramo principal (e galerias transversais envolventes) com cerca de 80 m de extensão (LABCARGA 2007-2008).

A antiguidade da mina, o abandono da sua exploração e o seu isolamento nas últimas décadas, aliados a um conjunto de condições ambientais favoráveis, levou a que a mina constitua, hoje em dia, um importante habitat. A perceção da existência destas características ambientais particulares, bem como de todos os aspetos patrimoniais, históricos e geológicos condicionou a solução de reabilitação projetada. A concretização da reabilitação parcial da mina poderá permitir que esta venha a constituir um geossítio, face ao seu particular valor pedagógico e turístico e, a longo-prazo, poderá estabelecer-se como um espaço geomuseológico, numa perspetiva de um novo ciclo de sustentabilidade (Meixedo et al. 2011, Lopes 2012).

4.2.2. Enquadramento regional

A região de Mire de Tibães enquadra-se, do ponto de vista geológico, numa área constituída por rochas metassedimentares, ladeadas pelos maciços graníticos de Braga, de Gondizalves e de Aveleda. Neste trabalho destacam-se as unidades geológicas que afloram na área em estudo (Teixeira et al. 1973, Leal Gomes et al. 1997, Meireles et al. 1997, Ferreira et al. 2000): i) Depósitos de cobertura; ii) Rochas metassedimentares; iii) Rochas graníticas; iv) Filões e massas; algumas destas massas foram alvo de explorações mineiras, no passado, dadas as suas mineralizações em volfrâmio e estanho. A característica geomorfológica mais evidente da área em apreço consiste no contraste entre o fundo plano dos vales e as vertentes íngremes das elevações que os ladeiam o que, de resto, constitui uma fisionomia comum na região Minhota (Figura 67).

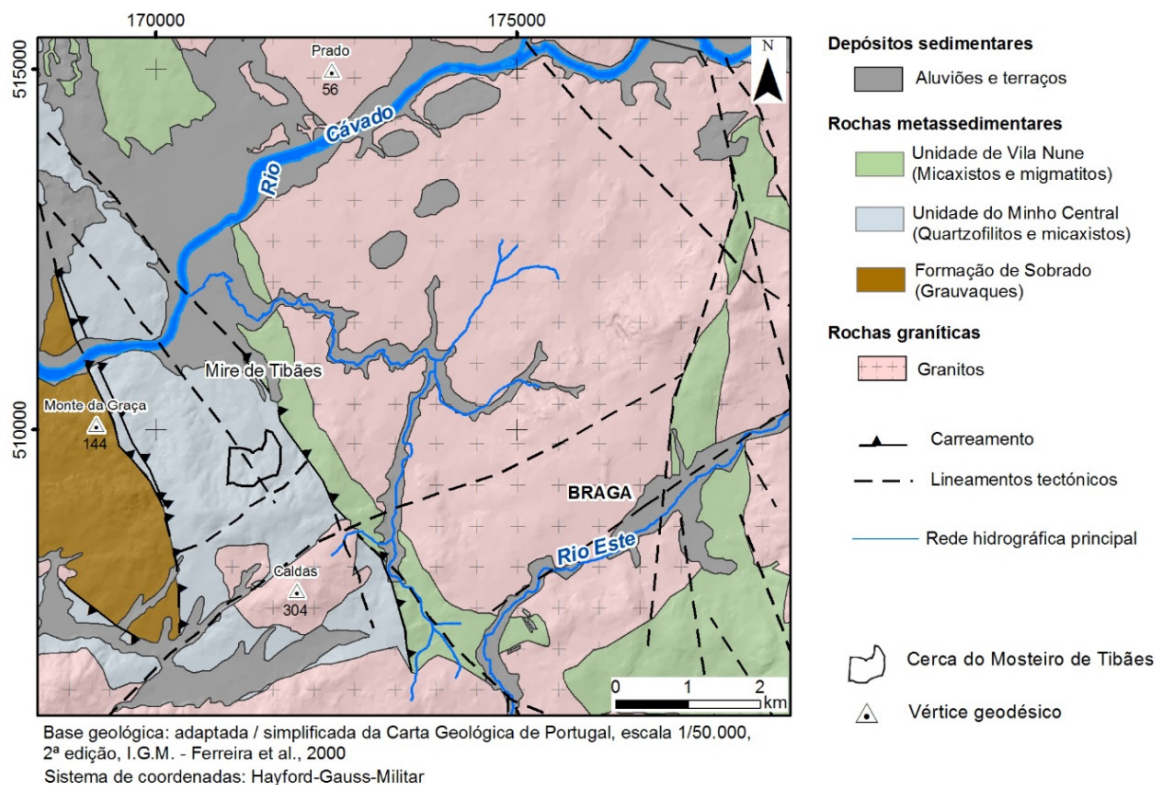


Figura 67. Enquadramento geológico regional de Mire de Tibães (adaptado de Ferreira et al. 2000). In: Trigo et al. (2013).

4.2.3. Descrição da Mina das Aveleiras

A mina das Aveleiras localiza-se, grosso modo, em flanco de encosta, a Norte do monte de S. Filipe. O antigo espaço mineiro trata-se, genericamente, de um jazigo de volfrâmio formado por um cortejo filoniano hidrotermal, donde se destacam estruturas quartzosas e aplitóides, típicas de bandas de cisalhamento dúctil a dúctil-frágil, com possanças apreciáveis. Estas estruturas hidrotermais enquadram-se no tipo de depósitos primários mineralizados com W-Au-As-Zn (Cotelo Neiva 1944, Leal Gomes & Gaspar 1992). A mina das Aveleiras tem uma entrada principal, de dimensões apreciáveis (ca. 1.8 m de largura por 2.4 m de altura), e outra, de menores dimensões (ca. 0.7 m de largura), correspondente à “mina de água das Aveleiras” (Figura 68).

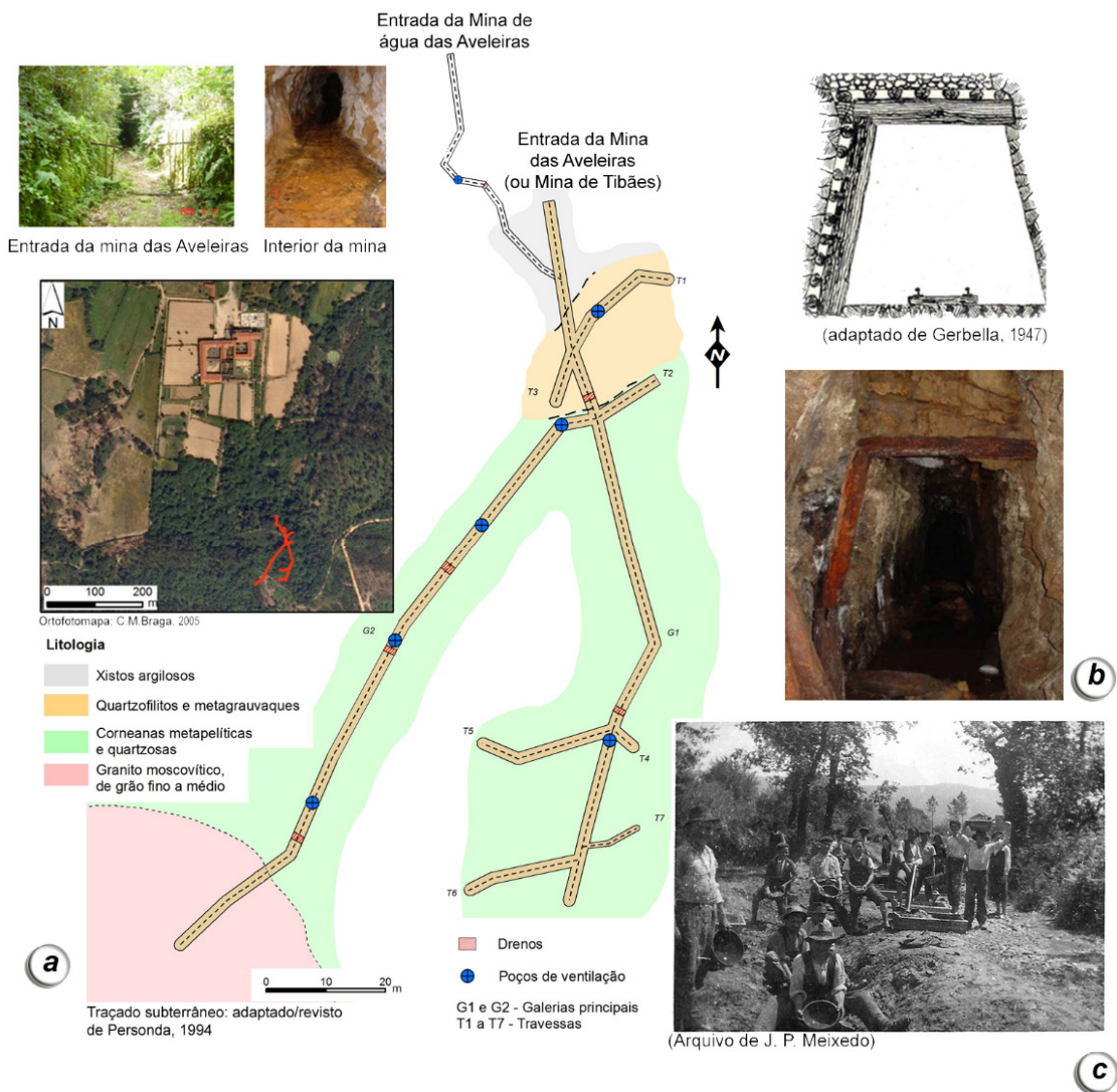


Figura 68. Aspectos diversos da antiga mina de volfrâmio das Aveleiras: a) esboço litológico do traçado subterrâneo e fotografias da entrada da mina, do seu interior e da vista aérea da Cerca do Mosteiro de Tibães; b) exemplo de sustimento em madeira original e esquema típico do manual “Arte Mineraria “ de Gerbella (1947); c) fotografia ilustrativa de trabalhos de pesquisa e processamento de minério de volfrâmio no Norte de Portugal (Minho), por volta de 1930 (adaptado de Meixedo et al. 2011 e de Lopes 2012). In: Trigo et al. (2013).

Os trabalhos mineiros realizados na área das Aveleiras constaram de algumas sanjas, numerosos poços e chaminés de ventilação, e várias galerias, quer em direção (longitudinais) quer transversais (designadas na linguagem geológico-mineira por “travessas”, T), com algumas centenas de metros de extensão (tal como se comprova nos relatórios inéditos dos Engenheiros Técnicos de Minas do Instituto Industrial do Porto: Lagoa 1941, Fonseca 1943, Pousada 1947). Estes trabalhos permitiram verificar a continuidade da mineralização, tanto em extensão como em profundidade. A galeria principal é muito ampla até aos 80 m de extensão, tendo em média 1.5 m de largura e 1.9 m de

altura. Aquando da exploração do volfrâmio, os hasteais e o teto da mina foram suportados por entivações de madeira, atualmente praticamente inexistentes, tendo-se verificado já a derrocada do teto em algumas secções (Figura 69). As galerias inspeccionadas da mina das Aveleiras cortam diversos filões de quartzo (Figura 70) que foram explorados pela mineralização em volframite. A paragênese primária típica é constituída por: arsenopirite, pirite, blenda, volframite e calcopirite (Teixeira et al. 1973, Alves et al. 2010). Foi reportada por Alves et al. (2010) a ocorrência do mineral scorodite⁷ sobre núcleos de yanomamite (i.e., portadoras do elemento índio, In), com um enriquecimento superficial em Fe, neoformados em cavidades de corrosão de sulfuretos nos detritos mineiros mais grosseiros dos despejos das Minas de Tibães. As estruturas filonianas hidrotermais anteriormente referidas concentram-se, fundamentalmente, ao longo das galerias G1 e G2, ocorrendo ainda ao longo das travessas T1 e T2.



Figura 69. Exemplos do estado de degradação dos suportes de madeira (com mais de 50 anos) da mina das Aveleiras (a, b) e aspetos de locais de abatimento pontual nas galerias da mina das Aveleiras (c, d). In: Lopes (2012).

⁷ Scorodite ($Fe^{3+}AsO_4 \cdot 2H_2O$): mineral comum de arsenato hidratado de ferro, do grupo da variscite (Alves et al. 2010).

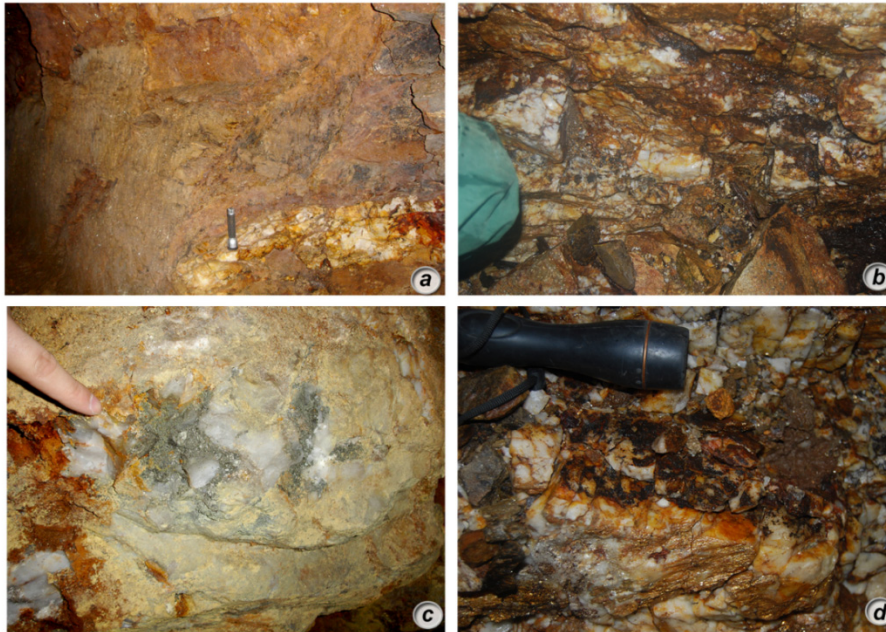


Figura 70. Aspeto das estruturas filonianas quartzosas observadas na mina das Aveleiras. In: Lopes (2012).

4.3. Mina das Aveleiras: estudos de geotecnia mineira

4.3.1. Generalidades

Para a definição da proposta de reabilitação da mina procedeu-se, numa fase inicial, à compilação exhaustiva da documentação histórica, patrimonial e técnico-científica existente e à realização de estudos cartográficos (geomorfológicos, geotectónicos e hidrogeológicos) de superfície. Seguidamente, realizou-se um estudo geológico e geotécnico mineiro, bem como investigações geomecânicas *in situ* e laboratoriais (LABCARGA 2007-2008), que suportaram o posterior dimensionamento de uma estrutura de reforço (Trigo et al. 2013). O signatário desta dissertação participou ativamente nesta fase de terreno e nos trabalhos de laboratório, em colaboração com o colega de mestrado Eng^o Ricardo Pereira (Pereira 2012), com a supervisão do Professor Helder I. Chaminé.

O objeto do estudo geotécnico foi a galeria principal G2 (Figura 68), visto que a galeria G1 foi anteriormente estudada em detalhe por LABCARGA (2007/2008), Neto (2007), Ramos (2009) e Pereira (2012). De referir ainda na categoria de estudos técnicos prévios, os relatórios técnicos da lavra da mina de Tibães da autoria de Lagoa (1941), de Fonseca (1943), de Pousada (1947), o relatório hidrogeológico da Personda (1994) e as dissertações de Flor Pereira (2010) e de Lopes (2012), as quais apresentam uma súpula de apontamentos diversos sobre o contexto geo-patrimonial envolvente e a rede hidráulica de Tibães. Além destes importantes documentos há uma série de

publicações científicas de interesse, a saber: Lopes et al. (2008), Meixedo et al. (2011), Trigo et al. (2013).

A galeria principal G2 apresenta dimensões equivalentes às da galeria G1, constituindo um tramo com cerca de 110 m de extensão, e aquela donde provém grande parte da água circulante na mina. A galeria principal G2 é interceptada por quatro poços de ventilação, realçando-se um deles, com cerca de 8 m de altura (com um piso superior), do qual circula muita água, conduzida para o chão da galeria G2 através de um tubo de polipropileno (Personda 1994). A parte terminal da galeria G1 tem cerca de 45 m de comprimento, é interceptada por um poço de ventilação e pelas travessas T4, T5, T6 e T7, e onde se encontra a galeria da nascente das Azeleiras (T7). O chão desta galeria encontra-se na maior parte da sua extensão coberto de água, nalguns locais com cerca de 50 cm de altura (Pereira 2012).

Procedeu-se, entre Abril-Maio de 2012 e Dezembro de 2012, ao levantamento geológico mineiro de pormenor (hasteais, teto e chão das galerias) para se definir o quadro geológico estrutural (de autoria dos Professores Helder I. Chaminé, Maria José Afonso e coadjuvados na vetorização cartográfica pelo Doutor J. Teixeira), seguindo-se o levantamento geotécnico mineiro, em particular a cartografia da rede de descontinuidades do maciço rochoso heterogéneo e a descrição dos parâmetros geológico-geotécnicos das superfícies estruturais e da matriz rochosa (Pereira 2012). Em ambos os levantamentos aplicou-se a técnica da amostragem linear. Procedeu-se, complementarmente, a ensaios geomecânicos “*in situ*” (ensaio esclerométrico) sobre as superfícies estruturais do maciço rochoso para se determinar a resistência à compressão uniaxial. Numa fase posterior, foi efectuada uma campanha de recolha de material-rocha (cerca de 50 kg) para a realização em laboratório do ensaio de carga pontual (PLT), no Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC|ISEP). No total foram cartografados, na Galeria 2, *in situ* 237 planos de descontinuidade e realizadas 47 estações geomecânicas (ensaio esclerométrico com martelo Schmidt, tipo L). Além disso, foram ensaiados em laboratório 31 provetes, recorrendo ao ensaio de carga pontual.

Todos os dados geológico-geotécnicos foram compilados, uniformizados e tratados de forma exhaustiva em duas bases de dados dinâmicas (SCANGEODATA|BGD e SCHMIDTDATA|UCS; Fonseca et al. 2010, Galiza et al. 2011 a,b,c). A análise estatística das descontinuidades foi efectuada com recurso ao programa geo-informático Dips v5.1 da RocScience® (licença LABCARGA|ISEP), o qual permitiu a definição das principais famílias de descontinuidades. Numa fase posterior, foi realizado o estudo da compartimentação do maciço rochoso com vista aos zonamentos geotécnico e geomecânico do maciço rochoso, bem como à aplicação das classificações geomecânicas (pormenores em Pereira 2012).

4.3.2. Estudo geológico, geotécnico e geomecânico mineiro

Como se referiu anteriormente, procedeu-se ao estudo geológico-geotécnico, recorrendo à técnica de amostragem linear, do hasteal direito da galeria principal G2 (tramo com 110 m) da mina das Aveleiras. Todavia, procedeu-se a inspeções sistemáticas do hasteal esquerdo, teto e chão da galeria; caso se justificasse executou-se, nessas partes da mina, um esboço cartográfico dos aspectos geológico-mineiros relevantes.

O maciço rochoso subterrâneo inspeccionado reflete globalmente a geologia de superfície e evidencia, de uma forma cabal, a existência de estruturas filonianas quartzosas e de filões aplitóides quartzo-feldspáticos. Assim, do ponto de vista geológico, o maciço estudado caracteriza-se, globalmente, como sendo de natureza metassedimentar, de granulometria fina, micáceo, com foliações tectonometamórficas (xistosidade e clivagem de fractura) e com intercalações de veios quartzosos. Foi identificada na Galeria 2 uma mancha de granito, de grão fino a médio. De uma maneira geral, o maciço encontra-se medianamente alterado a pouco alterado e com elevado grau de descontinuidades.

Nos hasteais das galerias cartografadas reconheceram-se as seguintes unidades litológicas (Pereira 2012):

- *Corneanas* – metapelíticas e quartzosas, de tonalidade castanha, com abundantes intercalações de segregações quartzosas, conferindo à rocha uma textura siliciosa, compacta e maciça. As corneanas apresentam-se pouco alteradas a alteradas (W_{1-2} a W_3)
As rochas apresentam uma xistosidade penetrativa bem desenvolvida, com uma orientação média N15° a 45°W e N30°E;
- *Filões e massas de quartzo* – estas estruturas estão, por vezes, brechificadas, com possança variável entre 0,5 e 1 m, com mineralização associada em volframite, pirite, arsenopirite. Foram registados filões com uma extensão superior a 10 m;
- *Filões e massas apliticas e/ou pegmatíticas quartzo-feldspáticas* – são estruturas com grão médio a fino, muito pouco alteradas (W_1); com possanças médias idênticas aos filões de quartzo;
- *Granito moscovítico de granularidade fina a média* – são a muito pouco alterado (W_{1-2}), de tonalidade esbranquiçada-amarelada a rosada, nas zonas mais ricas em feldspato. Esta unidade foi apenas cartografada na galeria G2.

No Quadro 45 e no Quadro 46 apresenta-se a síntese dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos referentes, respetivamente, à unidade das corneanas/aplitóides e ao granito (pormenores em Pereira 2012).

Quadro 45. Síntese dos parâmetros geológicos-geotécnicos e geomecânicos para a unidade das corneanas/aplitóides no maciço da galeria G2 (Mina das Azeleiras). In: Pereira (2012).






Galeria 2 - Mina das Azeleiras (Tibães)				Ilustrações
Tipo de litologia	Corneanas/Aplitóides			
Grau de alteração	W ₁₋₂	W ₃		
	86%	14%		
	N = 138 descontinuidades			
Estado de fracturação	Tipo de descontinuidade	Falha	Diaclase	
		10%	90%	
	Famílias principais	1 - N 115°– 130° E; 75° – 85° NE/SW 2 - N 100°– 110° E; 45° – 60° NE 3 - N 155°– 165° E; 60° – 70° SW		
Abertura	Fechada	Aberta	Muito aberta	
	39%	54%	7%	
	Valor médio = 7,6mm			
Grau de Fracturação (espaçamento / "fracture intercept", F)	F ₁₋₂	F ₃	F ₄₋₅	
	29%	44%	27%	
	Valor médio = 38,5cm			
Continuidade	Pouco contínua			
	100%			
Terminação	Rocha	Descontinuidade	Obscura	
	25%	42%	33%	
Curvatura	C ₁₋₂	C ₃	C ₄₋₅	
	75%	23%	1%	
Rugosidade	R ₁₋₂	R ₃	R ₄₋₅	
	73%	25%	2%	
Preenchimento	Argila	Rocha/Rocha esmagada	Nenhum	
	39%	11%	50%	
Percolação	Seco	Ligeiramente húmido a húmido	Húmido a gotejante	
	43%	54%	2%	
Resistência à Compressão Uniaxial "in situ"	S ₂	S ₃	S ₄	
	50%	46%	4%	
	Valor médio = 63,7 Mpa			
Resistência à carga pontual (PLT), nos Aplitóides	Valor médio de IS(50) = 5,29 MPa (S2)			

Quadro 46. Síntese dos parâmetros geológicos-geotécnicos e geomecânicos para a unidade do granito no maciço da galeria G2 (Mina das Aveleiras). In: Pereira (2012).

Galeria 2 - Mina das Aveleiras (Tibães)				Ilustrações
Tipo de litologia	Granito			
Grau de alteração	W ₁₋₂ 100%			
Estado de fracturação	N = 58 descontinuidades			
	Tipo de descontinuidade	Falha 26%	Diaclase 74%	
	Famílias principais	1 - N 165°- 175° E; 70° - 85° SW/NE 2 - N 60°- 70° E; 60° - 75° SE 3 - N 130°- 140° E; 70° - 85° SW		
Abertura	Fechada 78%	Aberta 7%	Muito aberta 16%	
Grau de Fracturação (espaçamento / "fracture intercept", F)	Valor médio = 14,6mm			
	F ₁₋₂ 22%	F ₃ 41%	F ₄₋₅ 36%	
Continuidade	Pouco contínua 100%			
Terminação	Rocha 21%	Descontinuidade 38%	Obscura 41%	
Curvatura	C ₁₋₂ 90%	C ₃ 9%	C ₄₋₅ 2%	
Rugosidade	R ₁₋₂ 66%	R ₃ 33%	R ₄₋₅ 2%	
Preenchimento	Argila 10%	Rocha/Rocha esmagada 7%	Nenhum 83%	
Percolação	Seco 16%	Ligeiramente húmido a húmido 78%	Húmido a gotejante 2%	Fluxo abundante 5%
Resistência à Compressão Uniaxial "in situ"	S ₂ 80%			
	S ₃ 20%			
	Valor médio = 89,6 Mpa			
Resistência à carga pontual (PLT), no Granito	Valor médio de IS(50) = 7,54 MPa (S2)			

Toda a informação recolhida foi uniformizada, processada e analisada de forma exaustiva e sistemática, com o intuito de ensaiar um possível quadro de correlação geológico-geotécnico entre os maciços rochosos da rede de galerias estudada. Assim, elaborou-se o quadro síntese (Quadro 47) e a Figura 72 em que se constata que, na sua globalidade, as características geotécnicas e geomecânicas das galerias estudadas são coerentes. De realçar que ambas as galerias apresentam zonas geotécnicas com um padrão litológico semelhante, predominantemente, as corneanas quartzosas e metapelíticas. Por outro lado, na galeria G2 identificaram-se duas litologias, com expressiva representatividade cartográfica, os aplitóides quartzo-feldspáticos e os granitos moscovíticos.

Quadro 47. Síntese dos parâmetros do zonamento geotécnico do maciço rochoso da galeria mineira G2, Mina das Azeleiras (revisto e adaptado de Pereira 2012).

Zona Geotécnica (ZG)	Ilustrações	Litologia	Grau de alteração	Grau de fracturação	Grau de resistência	
			Alteração	Espaçamento	UCS (MPa)	PLT (MPa)
Galeria 2 (115 m)	ZG1.(G2)		W ₁₋₂	F ₂ a F ₃ [90-40 cm]	65-90	4 - 6
	ZG2.(G2)		W ₁₋₂	F ₃ a F ₄ [35-75 cm]	30 - 55	n.d.
	ZG3.(G2)		W ₁₋₂	F ₃ a F ₄ [40-15 cm]	95-125	n.d.
	ZG4.(G2)		W ₁	F ₄ a F ₃ [10-30 cm]	40 - 50	n.d.
	ZG5.(G2)		W ₁	F ₃ a F ₂ [40-65 cm]	75 - 110	8 - 10

n.d. - não determinado; * valores retirados de Lopes (2012)

G2 - Galeria 2

UCS - Resistência à compressão uniaxial; PLT - Resistência à carga pontual

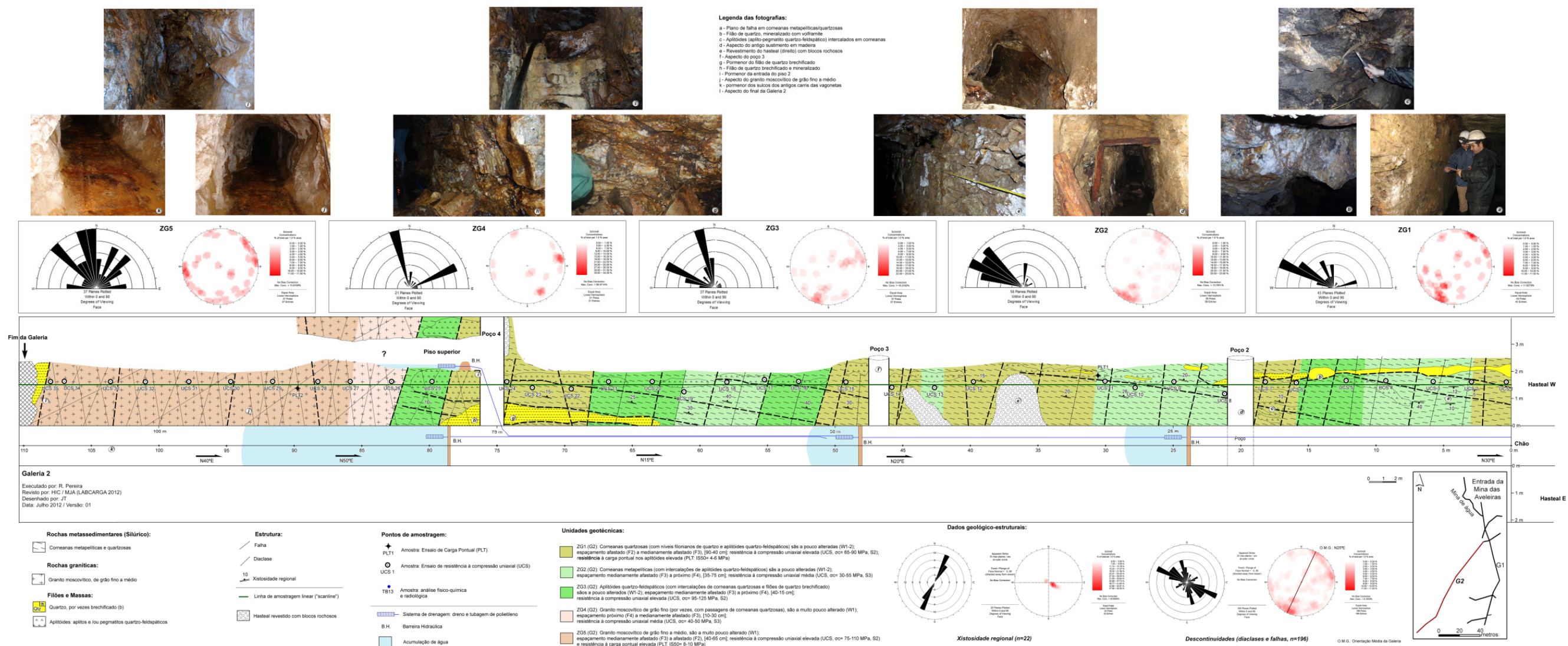


Figura 71. Cartografia das zonas geotécnicas mineiras da galeria principal G2 da mina das Aveleiras (adaptado de Pereira 2012; e levantamentos cartográficos geológico-mineiros inéditos de H.I. Chaminé e M.J. Afonso, 2006/2013).

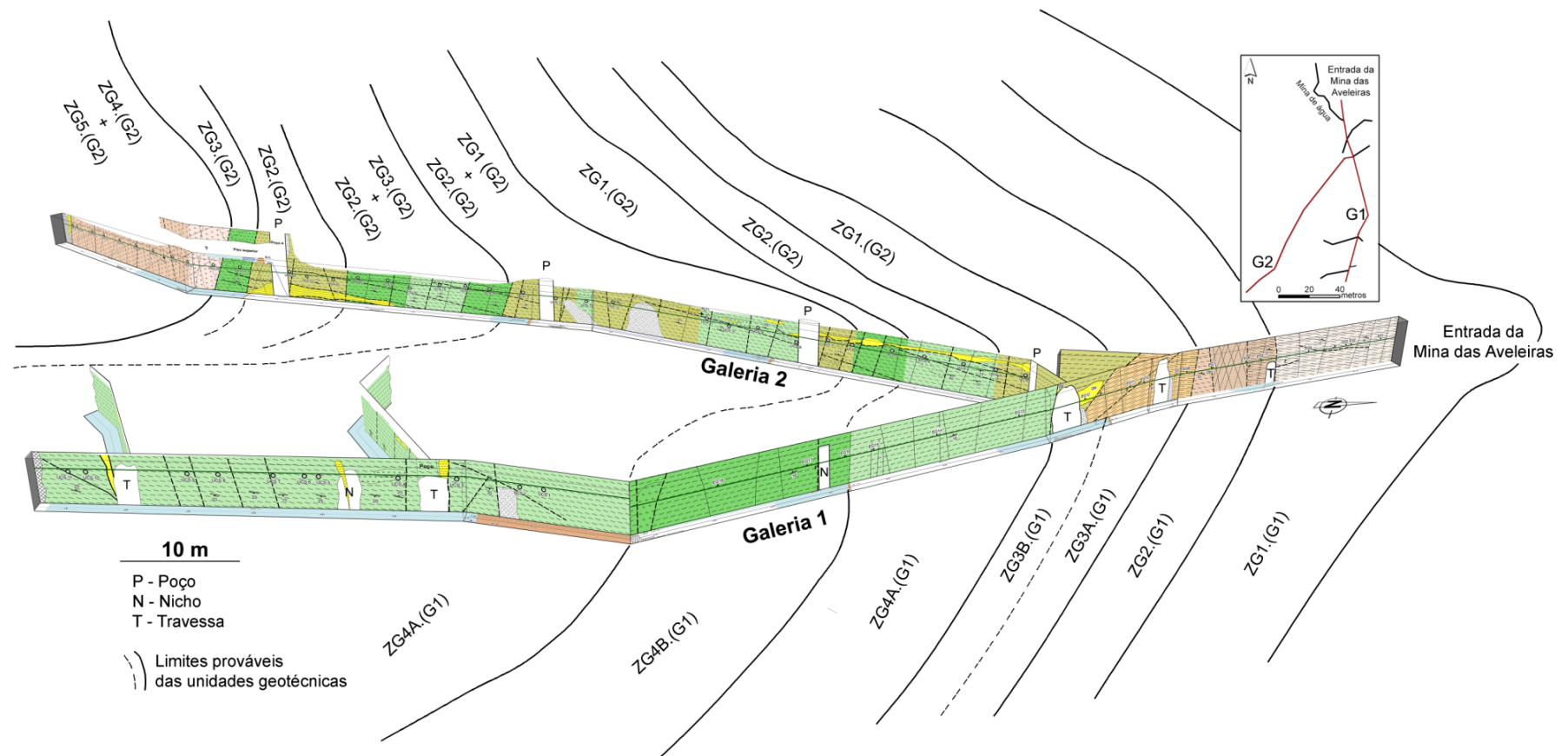


Figura 72. Síntese cartográfica da rede de galerias estudada da Mina das Aveleiras, com a representação do zonamento geotécnico e uma tentativa de correlação (cf. Quadro 46, para processo de legenda geotécnica), (revisado e atualizado de Pereira 2012).

4.4. Aplicação da *MGC-RocDesign/Calc*: maciço rochoso da mina das Azeleiras

4.4.1. Avaliação geomecânica com recurso às classificações de maciços rochosos: uma síntese

De seguida, é apresentada a aplicação dos sistemas de classificações de maciços rochosos às zonas geotécnicas referidas no Quadro 12, ou seja, aos principais sistemas de classificação geomecânica – RMR (e.g., Bieniawski 1973, 1976, 1979, 1989, 1993, Serafim & Pereira 1983, Barton & Bieniawski 2008) e *Q-system* (e.g., Barton et al. 1974, 1980, Barton 2006, Barton & Bieniawski 2008, NGI 2013), bem como aos índices geomecânicos – GSI (e.g., Hoek & Brown 1997, Hoek et al. 1998, Marinos & Hoek 2000, Marinos et al. 2005) e *HP-value* (Gates 1995, 1997, 2003). Todos os parâmetros geológicos, geotécnicos e geomecânicos foram obtidos e descritos, tal como referido, segundo as recomendações e procedimentos propostos pelas CFCFF (1996) e ISRM (2007). De forma a apoiar a aplicação das classificações geomecânicas dos maciços rochosos foi consultado um conjunto vasto de bibliografia especializada que se poderá encontrar no capítulo das referências e das quais se poderão destacar, entre outras, as obras de Terzaghi (1946), de Deere et al. (1967), de Deere & Deere (1988), de Bieniawski (1989, 1993), de Gates (1997, 2003), de Barton (2000, 2006), de Brady & Brown (2004), de Hoek (2007), de Scesi & Gattinoni (2009), de Palmström & Stille (2010) e de Singh & Goel (2011).

Para a aplicação destas classificações recorreu-se aos principais parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos do zonamento geotécnico da Galeria G2 da Mina das Azeleiras (Tibães) apresentados no Quadro 45 e no Quadro 46. Neste ensaio comparativo apenas nos restringiremos às classificações de maciços rochosos e índices geomecânicos principais (RMR, *Q-system*, GSI e *HP-value*), apesar de a calculadora permitir a computação de outros índices classificativos. Esta razão prende-se, fundamentalmente, por razões de ordem prática na comparação entre os dados de Pereira (2102) e os ora alcançados.

Apresentar-se-ão, seguidamente os resultados extraídos a partir da “Calculadora” *MGC-RocDesign/Calc* para o RMR, o *Q-system*, o GSI e o *HP-value*.

RMR – *Rock Mass Rating*

Para a classificação geomecânica RMR foram seguidos os parâmetros recomendados e definidos por Bieniawski (1989, 1993). Os parâmetros selecionados e os respetivos pesos resultantes da aplicação do RMR na Galeria G2 da Mina das Azeleiras (Tibães, Braga) estão sintetizados nos Quadro 48, Quadro 49, Quadro 50, Quadro 51, Quadro 52 e de acordo com a sua respetiva Zona Geotécnica. Como se pode constatar a qualidade global do maciço é razoável (Classe III). Contudo,

a zona ZG3(G2) classifica-se de qualidade fraca (IV) e a zona ZG5(G2) de qualidade boa (II). Se nos focalizarmos nos valores finais obtidos para estas duas zonas geotécnicas verificamos que estes se encontram na fronteira entre as classes fraca (IV) e razoável (III), e boa (II) e razoável (III), respetivamente. O valor mais baixo da zona ZG3(G2) e mais elevado da zona ZG5(G2) dever-se-á, fundamentalmente, à orientação das principais descontinuidades face à direcção média da galeria (pormenores em Pereira 2012).

Quadro 48. Aplicação da classificação geomecânica RMR à Galeria 2 – ZG1.

RMR - ZG1 - Galeria 2		
Parâmetros	ZG1	Peso
RQD - <i>Rock Quality Designation</i> (%)	30	8
Resistência à compressão uniaxial, UCS (MPa)	60,4	7
Carga Pontual $IS_{(50)}$ (MPa)	4	
Espaçamento (cm)	1	10
Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades	Continuidade 1m, abertura 3,3 mm, pouco rugosa sem preenchimento, ligeiramente alterado (W2)	19
Água subterrânea	Húmido (H)	7
Correção da orientação das descontinuidades (túneis e minas)	Direção perpendicular ao eixo do túnel Contra o pendor 45 - 90° Razoável	-5
Valor final	Maciço razoável	46
Classificação	Classe III	

Quadro 49. Aplicação da classificação geomecânica RMR à Galeria 2 – ZG2.

RMR - ZG2 - Galeria 2		
Parâmetros	ZG2	Peso
RQD - <i>Rock Quality Designation</i> (%)	30	8
Resistência à compressão uniaxial, UCS (MPa)	38	
Carga Pontual $IS_{(50)}$ (MPa)	1,5	4
Espaçamento (cm)	1	10
Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades	Continuidade 1m, abertura 10 mm, pouco rugosa (R3), sem preenchimento, são (W1)	19
Água subterrânea	Húmido (H)	7
Correção da orientação das descontinuidades (túneis e minas)	Direção perpendicular ao eixo do túnel Contra o pendor 45 - 90° Razoável	-5
Valor final	Maciço razoável	43
Classificação	Classe III	

Quadro 50. Aplicação da classificação geomecânica RMR à Galeria 2 – ZG3.

RMR - ZG3 - Galeria 2		
Parâmetros	ZG3	Peso
RQD - <i>Rock Quality Designation</i> (%)	20	3
Resistência à compressão uniaxial, UCS (MPa)	107,2	12
Carga Pontual $IS_{(50)}$ (MPa)	6	10
Espaçamento (cm)	1	10
Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades	Continuidade 1m, abertura 1-3 mm, rugosa (R4), sem preenchimento, são (W1)	22
Água subterrânea	Gotejante (H)	7
Correção da orientação das descontinuidades (túneis e minas)	Direção perpendicular ao eixo do túnel A favor do pendor 45 - 90° Muito desfavorável	-12
Valor final	Maciço fraco	39
Classificação	Classe IV	

Quadro 51. Aplicação da classificação geomecânica RMR à Galeria 2 – ZG4.

RMR - ZG4 - Galeria 2		
Parâmetros	ZG4	Peso
RQD - <i>Rock Quality Designation</i> (%)	15	3
Resistência à compressão uniaxial, UCS (MPa)	43,2	4
Carga Pontual $IS_{(50)}$ (MPa)	2	10
Espaçamento (cm)	22	10
Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades	Continuidade 0,5 m, abertura 0,5 mm, pouco rugosa (R3), sem preenchimento, são (W1)	25
Água subterrânea	Gotejante (H)	7
Correção da orientação das descontinuidades (túneis e minas)	Direção perpendicular ao eixo do túnel A favor do pendor 45 - 90° Muito favorável	0
Valor final	Maciço fraco	49
Classificação	Classe III	

Quadro 52. Aplicação da classificação geomecânica RMR à Galeria 2 – ZG5.

RMR - ZG5 - Galeria 2		
Parâmetros	ZG5	Peso
RQD - <i>Rock Quality Designation</i> (%)	35	8
Resistência à compressão uniaxial, UCS (MPa)	101,2	12
Carga Pontual $IS_{(50)}$ (MPa)	7,5	10
Espaçamento (cm)	1	10
Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades	Continuidade 1 m, abertura 0,5 mm, pouco rugosa (R3), sem preenchimento, são (W1)	25
Água subterrânea	Algo Húmido (AG)	7
Correção da orientação das descontinuidades (túneis e minas)	Direção perpendicular ao eixo do túnel A favor do pendor 20 - 45° Favorável	-2
Valor final	Maciço bom	61
Classificação	Classe II	

Q-system

Esta classificação geomecânica foi realizada com base nos parâmetros preconizados por Barton et al. (1974, 1980) e NGI (2013). Assim, para a Galeria 2 da Mina das Aveleiras (Tibães) os parâmetros selecionados e os valores resultantes da aplicação Q-system encontram-se sintetizados no Quadro 53, Quadro 54, Quadro 55, Quadro 56 e Quadro 57. Como se pode observar, o maciço é caracterizado globalmente como de qualidade fraca. No entanto, para as zonas ZG3(G2) e ZG4(G2) os valores finais encontram-se no limite entre as classes fraca e muito fraca. Os valores mais baixos, atribuídos às zonas ZG3(G2) e ZG4(G2), devem-se, fundamentalmente, ao valores do grau de fraturação RQD (pormenores em Pereira 2012).

Quadro 53. Aplicação da classificação geomecânica Q-system à Galeria 2 – ZG1.

Q-System - ZG1 - Galeria 2		
Parâmetros	ZG1	Valor
RQD - Rock Quality Designation	Fraco	30
Jn - Joint set number	F - Três	9
Jr - Joint roughness number	E - Rugosas ou irregulares, planares	1,5
Ja - Joint alteration number	D - Paredes com partículas silto-arenosas, pequena fracção argilosa (não branda)	3
Jw - Joint water reduction	B - Caudal médio ou pressão que arraste o preenchimento das descontinuidades	0,66
SRF - Stress Reduction Factor	K - Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade, pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	0,5
Valor final		2,20
Classificação	Maciço fraco	

Quadro 54. Aplicação da classificação geomecânica Q-system à Galeria 2 – ZG2.

Q-System - ZG2 - Galeria 2		
Parâmetros	ZG2	Valor
RQD - Rock Quality Designation	Fraco	30
Jn - Joint set number	F - Três	9
Jr - Joint roughness number	E - Rugosas ou irregulares, planares	1,5
Ja - Joint alteration number	E - Paredes com partículas de materiais moles ou baixo atrito; < quantidades de argilas expansivas	4
Jw - Joint water reduction	A - Escavações secas ou caudal baixo (<5 L/min)	1
SRF - Stress Reduction Factor	K - Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade, pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	0,5
Valor final		2,50
Classificação	Maciço fraco	

Quadro 55. Aplicação da classificação geomecânica Q-system à Galeria 2 – ZG3.

Q-System - ZG3- Galeria 2		
Parâmetros	ZG3	Valor
RQD - Rock Quality Designation	Muito fraco	20
Jn - Joint set number	F - Três	9
Jr - Joint roughness number	E - Rugosas ou irregulares, planares	1,5
Ja - Joint alteration number	D - Paredes com partículas silto-arenosas, pequena fracção argilosa (não branda)	3
Jw - Joint water reduction	C - Caudal elevado ou pressão elevada em rochas competentes sem preenchimento	0,5
SRF - Stress Reduction Factor	K - Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade, pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	0,5
Valor final		1,11
Classificação	Maciço fraco	

Quadro 56. Aplicação da classificação geomecânica Q-system à Galeria 2 – ZG4.

Q-System - ZG4 - Galeria		
Parâmetros	ZG4	Valor
RQD - Rock Quality Designation	Muito fraco	15
Jn - Joint set number	F - Três	9
Jr - Joint roughness number	E - Rugosas ou irregulares, planares	1,5
Ja - Joint alteration number	D - Paredes com partículas silto-arenosas, pequena fracção argilosa (não branda)	1
Jw - Joint water reduction	B - Caudal médio ou pressão que arraste o preenchimento das descontinuidades	0,66
SRF - Stress Reduction Factor	K - Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade, pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	1,5
Valor final		1,10
Classificação	Maciço fraco	

Quadro 57. Aplicação da classificação geomecânica Q-system à Galeria 2 – ZG5.

Q-System - ZG5 - Galeria 2		
Parâmetros	ZG5	Valor
RQD - Rock Quality Designation	Fraco	35
Jn - Joint set number	H - Quatro ou mais descontinuidades esparsas, maciço altamente fracturado	15
Jr - Joint roughness number	E - Rugosas ou irregulares, planares	1,5
Ja - Joint alteration number	B - Paredes não alteradas, somente com leve descoloração	1
Jw - Joint water reduction	A - Escavações secas ou caudal baixo (<5 L/min)	1
SRF - Stress Reduction Factor	K - Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade, pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	1,5
Valor final		2,33
Classificação	Maciço fraco	

GSI – Geological Strength Index

O GSI poderá ser determinado, como referido no capítulo 2, de diferentes formas. Uma das quais prende-se com a correlação numérica entre o GSI e o valor de RMR, ou seja $GSI = RMR - 5$, desde que o $RMR > 23$ (Hoek 2007). No entanto, para Barton (2001) esta relação algébrica, dado o seu carácter simplista e redutor, não é adequada no estado atual do conhecimento das classificações geomecânicas e deverá ser abandonada. Todavia, outros autores referem-na como válida e plausível para se proceder a uma avaliação exploratória do GSI (e.g., Hoek 2007, Singh & Goel 2011). Nesta análise recorreu-se aos intervalos de RMR propostos no Quadro 48, Quadro 49, Quadro 50, Quadro 51 e Quadro 52, obtendo-se desta forma intervalos classificativos para o GSI. Assim, para a avaliação deste índice geológico-geomecânico foram inferidos os intervalos dos valores de GSI através dos ábacos de Hoek & Marinos (2000) e Marinos & Hoek (2001), (Figura 73 e Figura 74). No que diz respeito às unidades metassedimentares (Figura 73), a geoestrutura do maciço é globalmente compartimentada a muito compartimentada, com algum grau de deformação e o estado das descontinuidades varia de razoável, na zona ZG3(G2), a bom nas zonas ZG1(G2) e ZG2(G2). Desta forma, a zona ZG1(G2) e ZG2(G2) classificam-se de qualidade fraca a razoável e a zona ZG3(G2) de qualidade razoável. Quanto ao maciço granítico (Figura 74), a geoestrutura deste é muito compartimentada, na zona geotécnica ZG4(G2), e compartimentada na zona ZG5(G2). Relativamente ao estado das descontinuidades, este varia entre muito bom, na ZG4(G2), e bom, na ZG5(G2). Assim, ambas as zonas classificam-se de qualidade boa (pormenores em Pereira 2012).

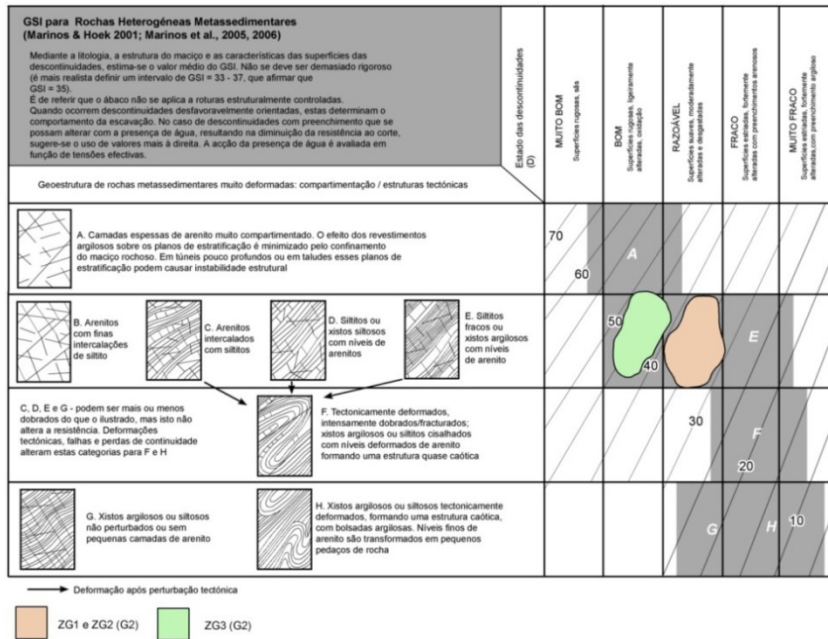


Figura 73. Representação do GSI para as zonas geotécnicas ZG1, ZG2 e ZG3 da Galeria 2 no ábaco de Marinos & Hoek (2001). Adaptado de Pereira (2012).

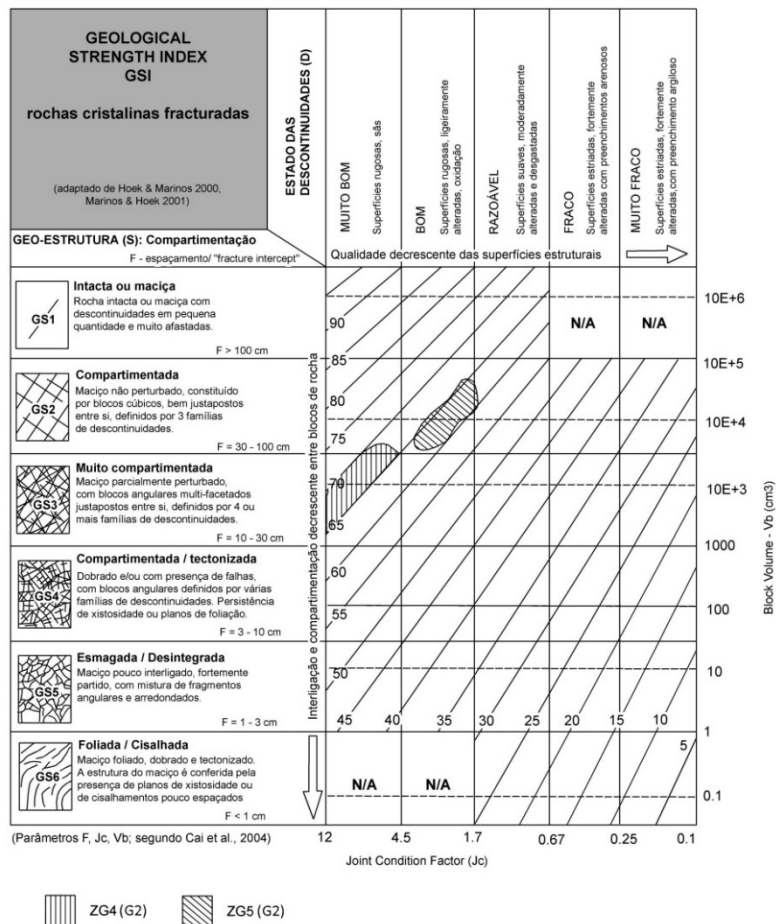


Figura 74. Representação do GSI para as zonas geotécnicas ZG4 e ZG5 da Galeria 2 no ábaco de Hoek & Marinos (2000), com atualizações de Cai et al. (2004). Adaptado de Pereira (2012).

HP-value

O índice hidrogeomecânico *HP-value* foi avaliado com base nos parâmetros propostos por Gates (1995, 1997, 2003), quatro dos quais são, como se referiu anteriormente, comuns à classificação geomecânica *Q-System* (J_n , J_r , J_{af} e J_k). Os intervalos de classificação da qualidade do maciço serão determinados com base nos limites propostos na classificação *Q-system* de Barton et al. (1974, 1980). Gates (1995, 1997, 2003) refere que os valores de HP variam entre 1.33×10^{-3} , para maciços de muito fraca qualidade, e 800, para maciços de qualidade excelente. Assim, com base nestes dois valores referência e no facto deste índice seguir de perto a classificação *Q-system*, avançar-se-á então com os valores e resultados da qualidade do maciço segundo o *HP-value* (Quadro 58, Quadro 59, Quadro 60, Quadro 61e Quadro 62).

Pode verificar-se que todas as zonas geotécnicas pertencem à classe de qualidade fraca, sendo a zona ZG3(G2) a que apresenta o valor mais baixo. Por outro lado, os caudais globais expetáveis no maciço são extremamente baixos (inferiores a 25 L/min, excetuando a zona ZG3(G2), que apresenta valores na ordem dos 130 L/min, i.e., cerca 2 L/s). Estes caudais muito baixos a baixos enquadram-se nos valores típicos para captações de água subterrânea em rochas metassedimentares fraturadas, i.e., < 2 L/s (e.g., Carvalho 2006, Carvalho et al. 2007). Além disso, o caudal de água avaliado na Mina das Aveleiras, por Personda (1994), ronda os 0,7 L/s, o que está de acordo com os valores obtidos (pormenores em Pereira 2012).

Quadro 58. Aplicação da classificação geomecânica *HP-value* à Galeria 2 – ZG1.

HP-value - ZG1 - Galeria 2		
Parâmetros	ZG1	Valor
RQD - Rock Quality Designation (%)	Fraco	30
J_n - Joint set number	F - Três	9
J_r - Joint roughness number	E - Rugosas ou irregulares, planares	1,5
J_{af} - Joint aperture factor	0,1 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 1,0 mm	1,2
J_k - Joint conductivity factor	Maioria das descontinuidades com preenchimento argiloso, baixo fluxo	1
J_w - Joint water factor	Gotas	0,86
Valor final		3,58
Classificação	Maciço fraco	

Quadro 59. Aplicação da classificação geomecânica HP-value à Galeria 2 – ZG2.

HP-value - ZG2 - Galeria 2		
Parâmetros	ZG2	Valor
RQD - Rock Quality Designation (%)	Fraco	30
Jn - Joint set number	F - Três	9
Jr - Joint roughness number	E - Rugosas ou irregulares, planares	1,5
Jaf - Joint aperture factor	1,0 < Abertura de 90% das descontinuidades ≤ 5,0mm	1,4
Jk - Joint conductivity factor	Descontinuidades fechadas ou seladas com calcite/quartzo; sem fluxo	1
Jw - Joint water factor	Húmido	0,94
Valor final		3,36
Classificação	Maciço fraco	

Quadro 60. Aplicação da classificação geomecânica HP-value à Galeria 2 – ZG3.

HP-value - ZG3 - Galeria 2		
Parâmetros	ZG3	20
RQD - Rock Quality Designation (%)	Muito Fraco	9
Jn - Joint set number	F - Três	1,5
Jr - Joint roughness number	E - Rugosas ou irregulares, planares	1
Jaf - Joint aperture factor	Descontinuidades todas fechadas, < 0,1 mm	2
Jk - Joint conductivity factor	90% das descontinuidades com preenchimento argiloso; baixo fluxo	0,86
Jw - Joint water factor	Gotas	1,43
Valor final		
Classificação	Maciço fraco	

Quadro 61. Aplicação da classificação geomecânica HP-value à Galeria 2 – ZG4.

HP value - ZG4 - Galeria 2		
Parâmetros	ZG4	Valor
RQD - Rock Quality Designation (%)	Muito Fraco	15
Jn - Joint set number	F - Três	9
Jr - Joint roughness number	E - Rugosas ou irregulares, planares	1,5
Jaf - Joint aperture factor	Descontinuidades todas fechadas, < 0,1 mm	1
Jk - Joint conductivity factor	Descontinuidades fechadas ou seladas com calcite/quartzo; sem fluxo	1
Jw - Joint water factor	Gotas	0,86
Valor final		2,15
Classificação	Maciço fraco	

Quadro 62. Aplicação da classificação geomecânica HP-value à Galeria 2 – ZG5.

HP value - ZG5 - Galeria 2		
Parâmetros	ZG5	Valor
RQD - Rock Quality Designation (%)	Muito Fraco	35
Jn - Joint set number	H -Quatro ou mais descontinuidades esparsas, maciço altamente fraturado	15
Jr - Joint roughness number	E - Rugosas ou irregulares, planares	1,5
Jaf - Joint aperture factor	Descontinuidades todas fechadas, < 0,1 mm	1
Jk - Joint conductivity factor	Descontinuidades fechadas ou seladas com calcite/quartzo; sem fluxo	1
Jw - Joint water factor	Gotas	0,94
Valor final		3,29
Classificação	Maciço fraco	

Nas Figura 75 e Figura 76 apresentam-se dois exemplos de “relatórios” (em formato tabela) gerados automaticamente a partir da “Calculadora” **MGC-RocDesign|Calc.**

RMR - Rock Mass Rating							
Parâmetros de classificação e os seus pesos							
	Parâmetro		Valores				
1	Resistência mecânica	Carga Pontual IS(50) (MPa)	4				
		Compressão Uniaxial UCS (MPa)	60,4				
		Peso	7				
2	Qualidade da Rocha (RQD) %		30				
	Peso		8				
3	Espaçamento das descontinuidades		1				
	Peso		10				
4	Condições geotécnicas das descontinuidades		Continuidade (m)	Abertura (mm)	Rugosidade	Preenchimento	Grau de alteração
			1	3,3	Pouco Rugosa (R3)	Nenhum	Ligeiramente Alterado (W2)
	Peso		4	1	3	6	5
5	Água Subterrânea	Condições gerais		Húmido (H)			
		Peso		7			
	Soma (1,2,3,4 e 5)		51				
Pesos da orientação das descontinuidades							
Efeito da orientação e da inclinação das descontinuidades em túneis							
6	Túneis e minas	Direção Perpendicular ao Eixo do Túnel		Contra o pendor 45 - 90°			
		Efeito da orientação e da inclinação das descontinuidades em túneis		Razoável			
		Peso		-5			
RMR - Qualidade da Rocha							
7	RMR		46				
	Qualidade da Rocha: Classificação		Rocha Média				
Sustimento a partir do índice RMR							
8	Classe RMR		III				
	Escavação		Secção parcial (frente e baixo), avanço 1,5-3 m. Início do suporte após cada desmonte. Suporte completo a 10 m.				
	Sustimento	Pregagens (20 mm diâmetro envolvidas em betão)		Betão projetado	Cimbres		
Pregagens sistemáticas com 4 m de comprimento, espaçadas de 2 m nos hasteais e teto, com malha de aço no teto		50-100 mm no teto; 30 mm nos hasteais.	Nenhum.				

Criado por MGC-RocDesign|Calc
15/07/2013, 02:17

Figura 75. Exemplo do relatório do RMR gerado automaticamente a partir da “Calculadora” **MGC RocDesign|Calc.**

Figura 76. Exemplo do relatório do Q-system gerado automaticamente a partir da “Calculadora” *MGC-RocDesign|Calc*.

Q-system		
Parâmetros de classificação e os seus pesos		
	Parâmetro	Valores
1	Qualidade da Rocha (RQD) (%)	30
	Nº de famílias de descontinuidades - Jn	F - Três
	Peso	9
2	Índice de rugosidade - Jr	
	a) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades	
	b) Contacto entre as paredes de rocha antes de 10 cm de escorregamento	E - Rugosas ou irregulares, planares
	Peso	1,5
3	Índice de Alteração das Descontinuidades - Ja	
	a) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades	D - Paredes com partículas silto-arenosas, pequena fracção argilosa (não branda)
	Peso	3
4	Factor de redução do caudal de água - Jw	
		B - Caudal médio ou pressão que arraste o preenchimento das descontinuidades
	Peso	0,66
5	Estado de Tensão do Maciço - SRF	
	b) Rocha competente, problemas de tensão na rocha	K - Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade, pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)
	Peso	0,5
6	Q-system = $(RQD/Jn) \times (Jr/Ja) \times (Jw/SRF)$	
	Q	2,2
	Classificação	Rocha Má

Criado por *MGC-RocDesign|Calc*
15/07/2013, 02:20

4.4.2. Avaliação geomecânica com recurso à *MGC-RocDesign|Calc*: análise comparativa

Nesta seção iremos apresentar a avaliação geomecânica com recurso à “Calculadora” *MGC-RocDesign|Calc* da galeria mineira G2 do maciço rochoso heterogéneo e fraturado das Azeleiras/Tibães. Tentar-se-á, ainda, elencar e discutir, de uma forma breve, as vantagens, as limitações e as potencialidades da aplicação *MGC-RocDesign|Calc*.

Os resultados apresentados nos quadros anteriores do tópico 4.4.1. dizem respeito aos valores extraídos a partir da “Calculadora” *MGC-RocDesign|Calc*. O Quadro 63 permitirá confrontar com os resultados de Pereira (2012) obtidos, essencialmente, através da consulta de tabelas e ábacos, bem como apoiados, pontualmente, por uma simples folha de cálculo. Poder-se-á verificar, tal como previsto, que os valores calculados pela *MGC-RocDesign|Calc*, em comparação com os computados manualmente, são muito similares. Esta constatação confirma, de facto, a robustez da *MGC-RocDesign|Calc*. Na “Calculadora” *MGC-RocDesign|Calc* procedeu-se à ligação a uma plataforma de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) o que possibilitou uma série de mais valias, para além da georreferenciação de todos os dados indexados (a um identificador ID) na base de dados, mas sobretudo à análise espacial dos dados e assim elaborar de forma automática mapas temáticos, em particular a cartografia de zonamento geomecânico. A ligação é feita, no programa SIG *ArcGis*® através de um identificador comum (ID), em que é feita automaticamente a correspondência entre a tabela MS. *Excel*® gerada através da “Calculadora” *MGC-RocDesign|Calc* e a tabela relativa à caracterização dos diferentes polígonos das unidades do zonamento

geotécnico. Assim, é possível, de uma forma expedita, representar de forma gráfica, as diferentes classificações de maciços rochosos ou índices geomecânicos. Além disso, a ligação da tabela MS. *Excel*[®] ao SIG é dinâmica e atualizada de cada vez que se abre o projeto SIG correspondente, permitindo uma rápida atualização dos mapas correspondentes, através de uma simples atualização na tabela MS. *Excel*[®]. Como tal, é possível a criação de mapas temáticos, quer com representações cartográficas quantitativas (e.g., RQD) ou qualitativas (e.g., grau de compartimentação do maciço,...).

As Figura 77, Figura 78 e Figura 79 ilustram os vários mapas temáticos gerados relativos à cartografia de zonamento geomecânico para cada classificação de maciços rochosos ou índices geomecânicos, bem como se apresenta um ensaio de um mapa de zonamento geomecânico de síntese (Figura 80).

Quadro 63. Valores de todas as classificações geomecânicas estudadas por Pereira (2012).

RMR - Galeria 2					
Parâmetros	ZG1	ZG2	ZG3	ZG4	ZG5
	Peso	Peso	Peso	Peso	Peso
RQD (%)	8	8	3	3	8
Resistência compressão, UCS (MPa)	7	4	12	4	12
Carga Pontual IS ₍₅₀₎ (MPa)					
Espaçamento (cm)	10	10	10	10	10
Condições geológico-geotécnicas das descontinuidades	19	19	22	25	25
Água subterrânea	7	7	7	7	7
Correção da orientação das descontinuidades (túneis e minas)	-5	-5	-12	0	-2
Valor final	46	43	39	49	61
Classificação	Classe III	Classe III	Classe IV	Classe III	Classe II

Q-System - Galeria 2					
Parâmetros	ZG1	ZG2	ZG3	ZG4	ZG5
	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
RQD ("Rock quality designation")	30	30	20	15	35
Jn ("Joint set number")	9	9	9	9	15
Jr ("Joint roughness number")	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Ja ("Joint alteration number")	3	4	3	1	1
Jw ("Joint water reduction")	0,66	1	0,5	0,66	1
SRF ("Stress Reduction Factor")	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5
Valor final	2,2	2,50	1,11	1,10	2,33
Classificação	Maciço fraco	Maciço fraco	Maciço fraco	Maciço fraco	Maciço fraco

GSI - Galeria 2									
ZG1		ZG2		ZG3		ZG4		ZG5	
Intervalo	Valor	Intervalo	Valor	Intervalo	Valor	Intervalo	Valor	Intervalo	Valor
30 - 40	Fraca a Razoável	30 - 40	Fraca a Razoável	40-50	Razoável	65-70	Bom	60-65	Bom

HP-value - Galeria 2					
Parâmetros	ZG1	ZG2	ZG3	ZG4	ZG5
	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor
RQD ("Rock quality designation")	30	30	20	15	35
Jn ("Joint set number")	9	9	9	9	15
Jr ("Joint roughness number")	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Jaf ("Joint aperture factor")	1,2	1,4	1	1	1
Jk ("Joint conductivity factor")	1	1	2	1	1
Jw ("Joint water factor")	0,86	0,94	0,86	0,86	0,94
Valor final	3,58	3,36	1,43	2,15	3,29
Classificação	Maciço fraco	Maciço fraco	Maciço fraco	Maciço fraco	Maciço fraco

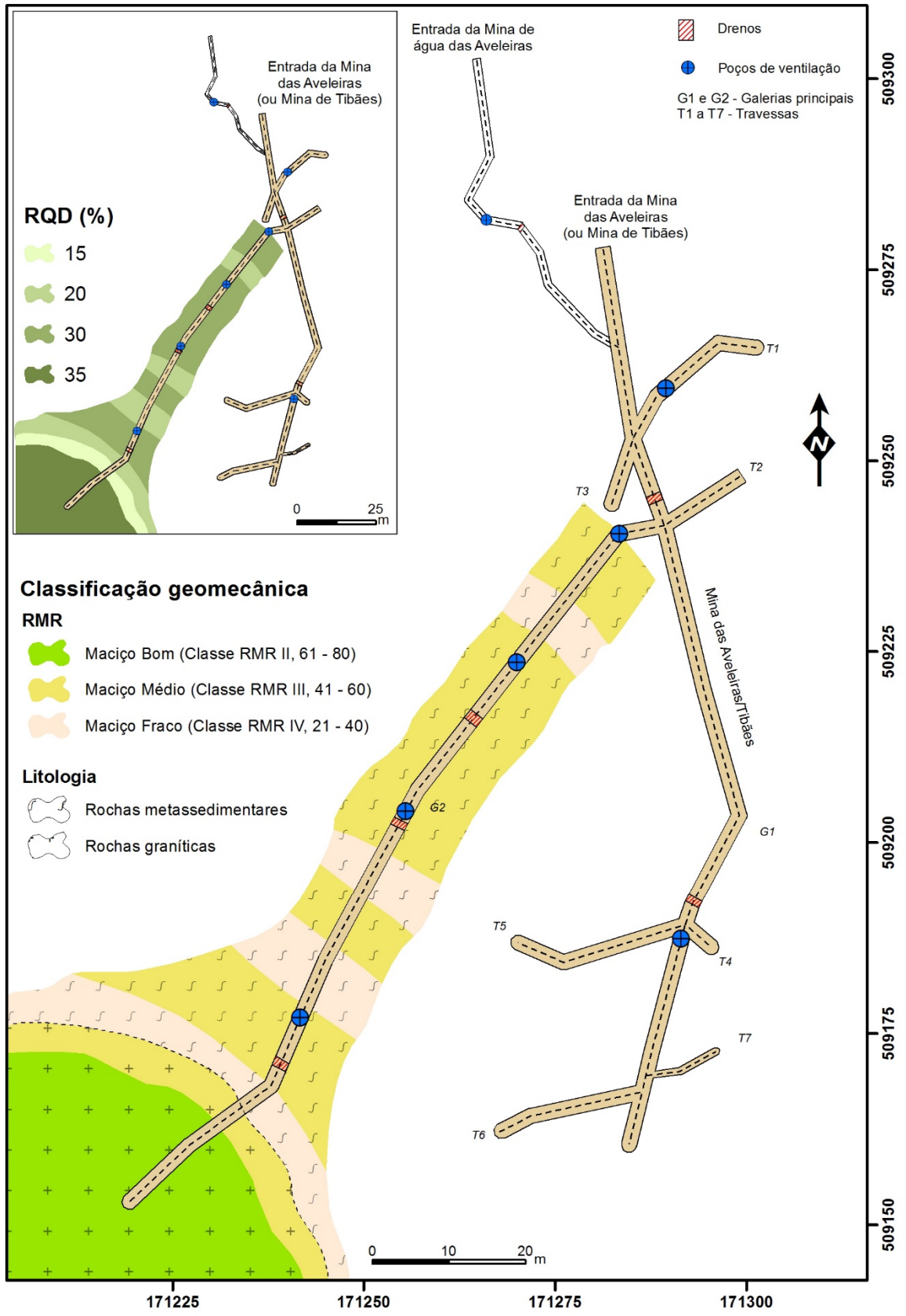
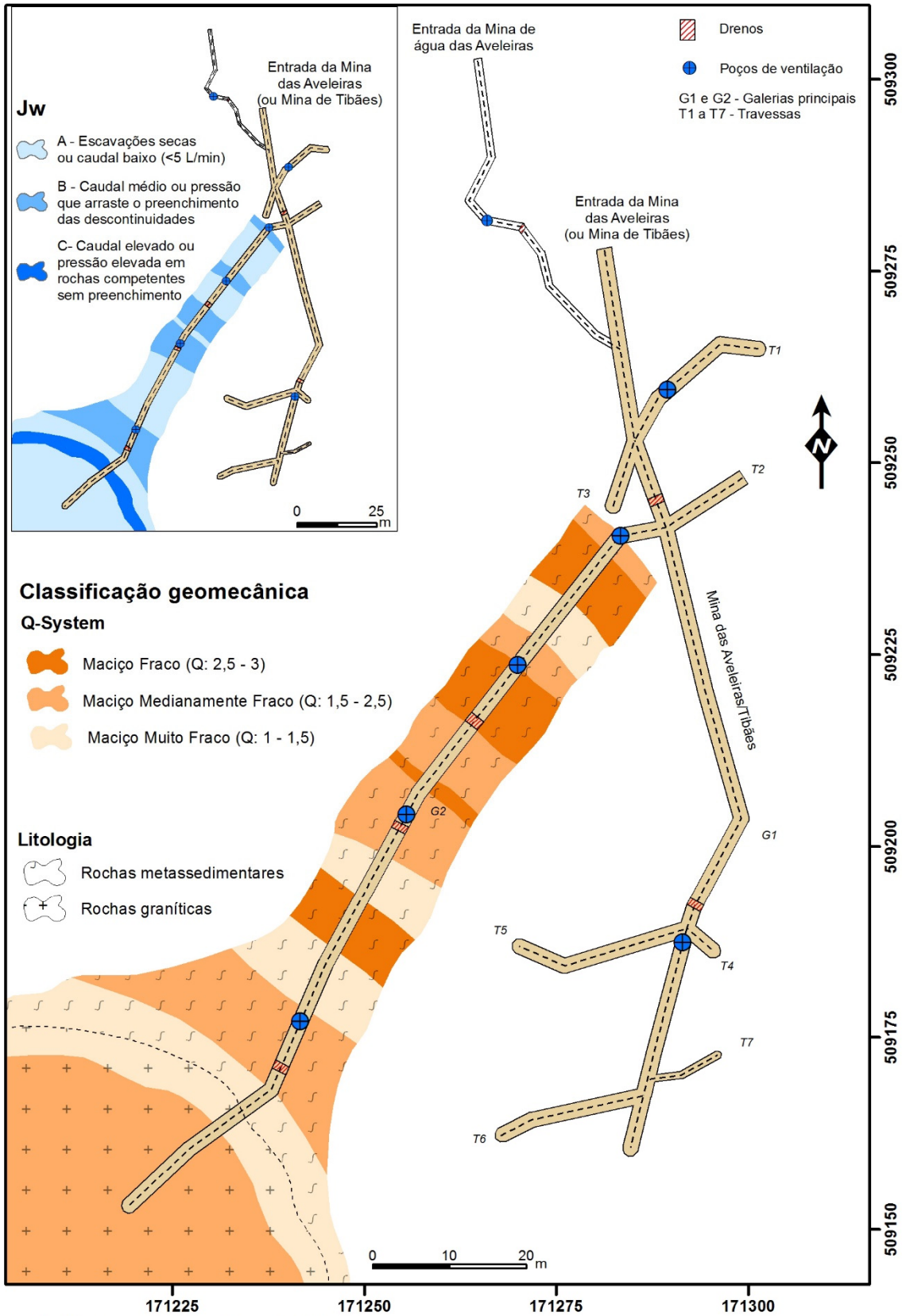


Figura 77. Mapa de zonamento RMR da mina das Aveleiras/Tibães (galeria G2).



Traçado subterrâneo: adaptado/revisto de Personda, 1994

Figura 78. Mapa de zonamento Q-system da mina das Aveleiras/Tibães (galeria G2).

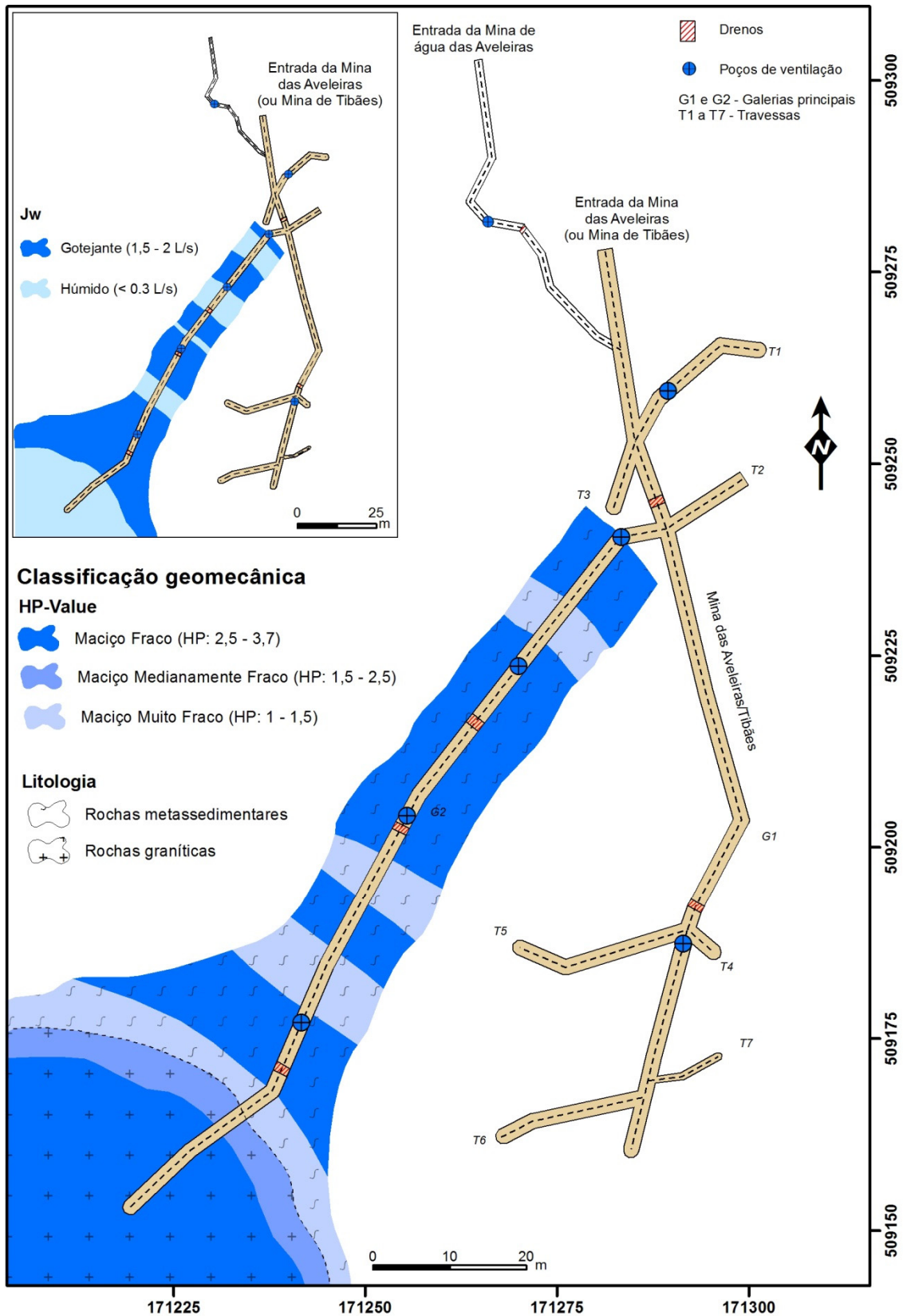


Figura 79. Mapa de zonamento do índice HP-value da mina das Aveleiras/Tibães (galeria G2).

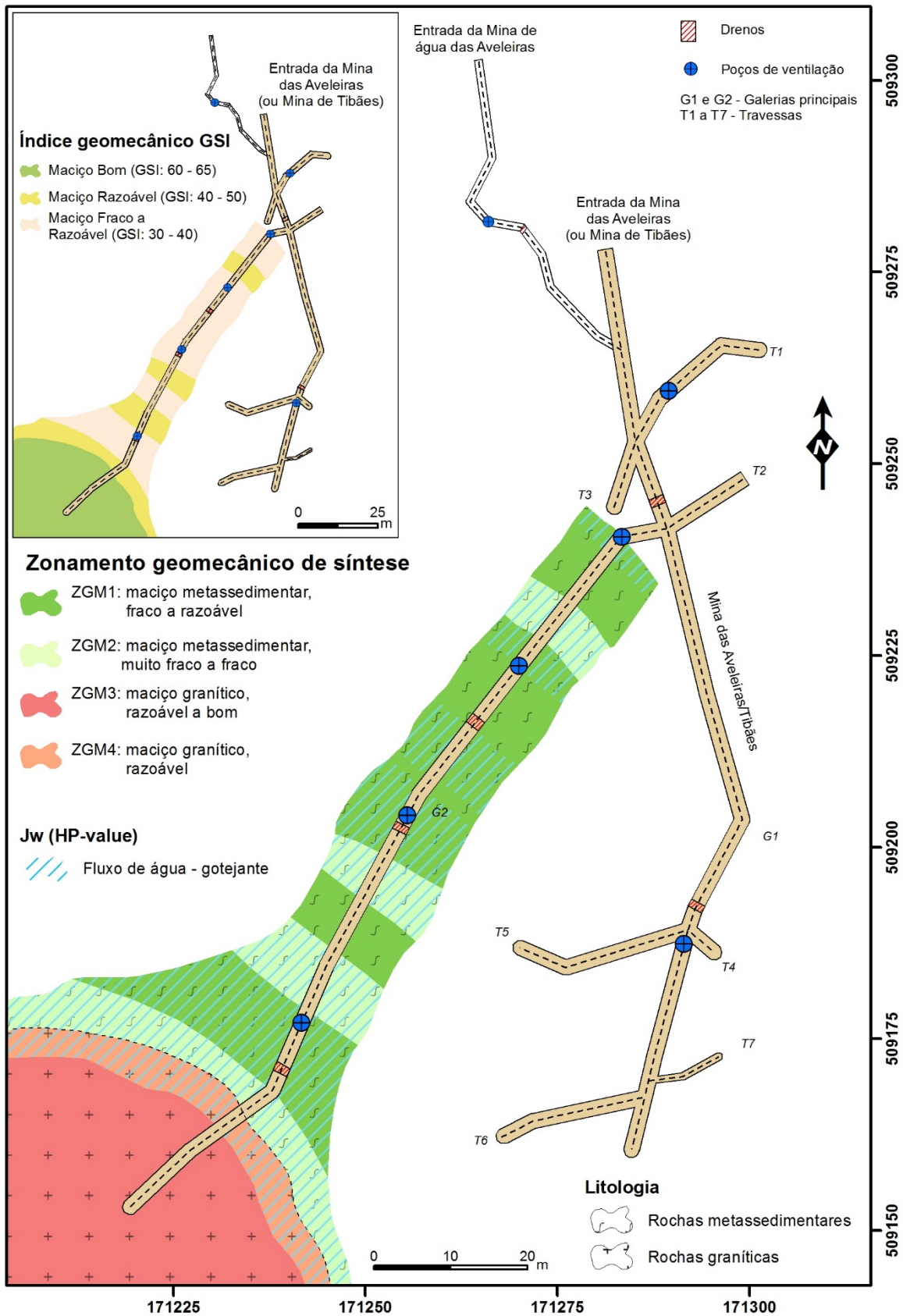


Figura 80. Mapa de zonamento geomecânico de síntese da mina das Aveleiras/Tibães (galeria G2).

Em síntese, poderemos estabelecer as seguintes considerações finais:

- i) A “Calculadora” ***MGC-RocDesign|Calc*** ora apresentada revela robustez ao nível do processamento, do tratamento e da análise na utilização dos dados de origem. Além disso, constata-se que a sua utilização é prática e adequada, seja para um utilizador básico ou mesmo avançado, bem como consideramos que a possibilidade da geração de “relatórios” (em formato tabela) parciais ou de síntese dos dados é de alta importância na análise e no arquivo da informação;
- ii) a principal limitação da ***MGC-RocDesign|Calc*** prende-se, na nossa perspetiva, com a própria natureza do programa MS. Excel[®], apesar de estarmos conscientes deste facto desde as primeiras fases de conceptualização e organização da estrutura da dissertação. Todavia a nossa opção recaiu, a despeito das intensas e frutuosas discussões tidas sobre o assunto⁸, de forma assumida para este formato, visto que o tempo disponível para a sua execução noutra linguagem de programação (e.g., PHP, Java, ...) ou programa informático (e.g., MS. Access) poderia colocar em causa a real exequibilidade da conclusão da tese;
- iii) as principais potencialidades da ***MGC-RocDesign|Calc*** são múltiplas, apesar das limitações referidas, desde a operacionalidade até à funcionalidade do aplicativo. Com efeito, a principal potencialidade foi a ligação a uma plataforma de Sistema de Informação Geográfica (SIG), em formato ArcGIS[®]. Por fim, de referir que o facto deste aplicativo correr em ambiente MS. Windows[®] possibilita a utilização em dispositivos portáteis, especialmente a nova geração de portáteis ultra-leves e “Tablets”, pelo que poderá ser usado em pleno trabalho de campo.
- iv) Por fim, em jeito de perspetivas futuras apontaremos as vantagens sobre a disponibilização do aplicativo ***MGC-RocDesign|Calc: Mining Geomechanics Classification systems for rock engineering design (version beta)***, em ambiente académico e de investigação, mas com potencialidades, a curto-prazo, para ser burilado numa versão ainda mais completa e robusta, adicionando outras classificações e outros ambientes geomecânicos, em particular, das classificações geomecânicas de taludes rochosos (SMR – Slope Mass Rating, por exemplo) e índices de excavabilidade dos maciços, bem como se pretenderá, via Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA|ISEP), registar os direitos de propriedade intelectual da equipa que apoiou e desenvolveu o presente aplicativo.

⁸ Em particular, com o orientador da dissertação, Professor Helder I. Chaminé, e com outros especialistas, especialmente, a Professora Maria Conceição Neves (departamento de informática do ISEP), Professora Maria José Afonso, Doutor José Teixeira e Dra Liliana Freitas (LABCARGA|ISEP). Nestas discussões estiveram envolvidas distintas perspetivas, desde aspetos puramente de computação até à própria natureza dos múltiplos dados dos maciços rochosos (cartografia, geologia, geologia de engenharia, hidrogeologia, mecânica das rochas, etc.), passando por todos os complexos aspetos da ligação a um ambiente SIG.

Capítulo 5 – Conclusões

5. Conclusões

“It is noted at this time that both the prediction of subsurface conditions and subsequent determination of needed ground support has been and still is essentially an “art”. Although the sciences of rock mechanics and geology are contributing to a more exacting approach, no significant breakthrough in scientific techniques is foreseeable in the near future.” (Wickham et al. 1974).

Esta dissertação pretendeu apresentar a criação de um programa informático original, funcional e robusto visando o desenvolvimento de uma “Calculadora” aplicada às classificações geomecânicas de maciços rochosos – aqui designada por **MGC-RocDesign|Calc: Mining Geomechanics Classification systems for rock engineering design (version beta)**⁹ – no sentido de funcionar como uma ferramenta de apoio tendo como duplo-objetivo, o da cartografia de zonamento geomecânico e o dimensionamento do suporte em ambiente subterrâneo. Além disso, pretendeu-se a integração da MGC-RocDesign|Calc numa plataforma de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e que funcionasse em ambiente MS. Windows[®], possibilitando a sua utilização no terreno através do uso de portáteis ultra-leves ou *tablets*.

Neste trabalho, apresentam-se e discutem-se ainda a importância e os principais resultados da aplicação das classificações geomecânicas mineiras *Rock Mass Rating (RMR)*, *Rock Tunnelling Quality Index (Q-system)* e dos índices geomecânicos *Geological Strength Index (GSI)* e *Hydro-Potential (HP) Value*, para avaliar a qualidade do maciço rochoso da Mina das Aveleiras (Tibães, Braga) através do uso do aplicativo **MGC-RocDesign|CALC**.

Este estudo envolveu a compilação, a integração e a interpretação das características geológico-geotécnicas e geomecânicas.

Do estudo, presentemente desenvolvido, resultam os seguintes aspetos conclusivos:

- Recolha, compilação e interpretação de dados anteriormente recolhidos do maciço rochoso da Mina das Aveleiras (Tibães, Braga);
- Criação, conceptualização e desenvolvimento do aplicativo **MGC-RocDesign|CALC** em MS. Excel[®], em linguagem VBA (*Visual Basic for Applications*)[®];
- Introdução dos dados no aplicativo desenvolvido das principais classificações geomecânicas mineiras *Rock Mass Rating (RMR)*, *Rock Tunnelling Quality Index (Q-*

⁹ Por razões de direitos de propriedade intelectual não será incluída em anexo o aplicativo informático MGC-RocDesign|CALC (version beta). Caso necessite de informações poderá escrever para o email: labcarga@isep.ipp.pt (consultar figura 62)

system) e dos índices geomecânicos *Geological Strength Index (GSI)* e *Hydro-Potential (HP) Value*;

- A qualidade do maciço da Galeria 2 do maciço rochoso da Mina das Aveleiras (Tibães, Braga) apresenta-se de qualidade fraca a razoável, os intervalos das classificações variam mediante os seguintes valores, *Rock Mass Rating (RMR)*: 46–61; *Rock Tunnelling Quality Index (Q-system)*: 1.1–2.5; *Geological Strength Index (GSI)*: 30–70; *Hydro-Potential (HP) Value*: 1.4–1.0, sendo estes valores coerentes com os anteriormente calculados por Pereira (2012);
- Em termos de avaliação exploratória geomecânica global da galeria estudada, os resultados apresentam valores similares aos anteriormente estabelecidos de forma manual por Pereira (2012);
- Elaboração de cartografia de zonamento geomecânica temática da Galeria 2 da Mina das Aveleiras (Tibães, Braga) de acordo com os resultados das classificações geomecânicas mineiras e dos índices geomecânicos.

Como trabalhos futuros poder-se-ão apontar, entre outros, os seguintes:

- Continuação do desenvolvimento do aplicativo, desde que sejam asseguradas as premissas de robustez e funcionalidade;
- Integração total das bases de dados dinâmicas *ScanGeoData/BGD* e *SchmidtData/UCS (GeoTech/CalcTools)* de forma a funcionarem numa única aplicação informática;
- Migração do aplicativo para uma linguagem de programação mais funcional (e.g., PHP™, Java™, ...) e compatível em termos de universalidade com outros sistemas operativos;
- Inclusão e desenvolvimento dos sistemas de classificação de maciços rochosos específicos, o *Mining Rock Mass Rating (M-RMR)*; Laubscher 1977, 1990), para túneis mineiros, o *Slope Mass Rating (SMR)*; Romana 1985, 1991, 1995), para taludes rochosos e o *Dam Mass Rating (DMR)*; Romana 2003), para as fundações de barragens em rocha.
- Alojamento dos dados num servidor para assegurar a possibilidade de serem acedidos remotamente.

Capítulo 6 – Referências bibliográficas

6. Referências bibliográficas

Aires-Barros, L. (1991). Alteração e alterabilidade de rochas. Instituto Nacional de Investigação Científica, Lisboa, 384 pp.

Almeida A. & Almeida J.D., 1988. Inventário hidrológico de Portugal. Volume IV – Minho, Instituto de Hidrologia de Lisboa. 505 p.

Alves R., Leal Gomes C. & Valente T., 2010. A associação yanomamite-scorodite e a mineralização supergénica de In em detritos mineiros de zonas de cisalhamento com W-Au-As-Zn, Norte de Portugal. e-Terra, Revista Electrónica de Ciências da Terra Geosciences On-line Journal. VIII Congresso Nacional de Geologia, 16(1): 1-4. (<http://www.metododirecto.pt/CNG2010/index.php/vol/article/view/421>).

Avelãs J.P., 2010. O Estado Novo e o volfrâmio (1933-1947): actividade mineira, "grande depressão" e Segunda Guerra Mundial. Imprensa da Universidade de Coimbra Edição. 575 p.

Barton, N. (2000). TBM tunnelling in jointed and faulted rock. Balkema, Rotterdam. 173 pp.

Barton N., (2001). Dr. Nick Barton's interview, Zagreb, 02.06.2011. In: http://www.isrm.net/fotos/editor2/nl14/interview_vrkljan_barton_isrm_2011.pdf (consultado em Maio de 2013).

Barton, N. (2006). Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Taylor & Francis, UK. 729 pp.

Barton, N. (2011). Dr. Nick Barton's interview, Zagreb, 02.06.2011. In: http://www.isrm.net/fotos/editor2/nl14/interview_vrkljan_barton_isrm_2011.pdf (consultado em Maio de 2013).

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.R.; Lien, R. & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, 6 (4): 189-239.

Barton, N.; Lien, R. & Lunde, J. (1977). Estimation of support requirements for underground excavations. In: 16th Symposium on Design Methods in Rock Mechanics Rock Mechanics, Minnesota, ASCE, NY, pp. 163-177.

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: Bergman M., ed., Proceedings,

Subsurface Space, ISRM International Symposium – Rockstore'80, Stockholm. Pergamon Press Ltd., 2: 553-561.

Barton, N. & Quadros, E.F. (2002). Engineering and Hydraulics in Jointed Rock Masses. EUROCK 2002 – Curso A, Funchal.

Bastos, M. (1998). Geotecnia na concepção, projeto e execução de túneis em maciços rochosos. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 153 pp. (tese de mestrado).

Bieniawski, Z.T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. Trans. South Afr. Inst. Civ. Engrs, 15: 335-344.

Bieniawski, Z. T. (1975). The point load test in geotechnical practice. Engineering Geology, pp. 1-11.

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. Proceedings of the 4th Congress Int. Soc. Rock Mech., Montreux, 2: 41-48.

Bieniawski, Z. T. (1984). The design process in rock engineering. Rock Mechanics and Rock Engineering, 17: 183-190.

Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering rock mass classifications. Wiley, New York. 251 pp.

Bieniawski, Z.T. (1993). Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends. Hudson J.A., (ed.), comprehensive rock engineering: principles, practice, and projects. Pergamon Press, 33: 553-574.

Bieniawski, Z.T.; 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.

Bieniawski, Z.T.; Celada, B. & Galera, J.M. (2007). Predicting TBM excavability. Tunnels and Tunnelling International. pp. 25-28.

Black, J.H. (1987). Flow and flow mechanisms in crystalline rock. In: Fluid Flow in Sedimentary Basins and Aquifers, Geol. Soc. Spec. Pub., 34: 186-200.

Bock, H. (2006). Common ground in engineering geology, soil mechanics and rock mechanics: past, present and future. Bull. Eng. Geol. Env., 65: 209-216.

Brady, B.H.G. & Brown, E.T. (2004). Rock mechanics for underground mining. Kulwer Academic Publishers, Dordrecht. 628 pp.

Broch, E. & Franklin, J. A. (1972). The point load strength test. Journal Rock Mech. Min. Sci, 9: 669-697.

Brown, E.T. (1991). Da teoria à prática em mecânica das rochas. *Ingenium, Revista da Ordem dos Engenheiros*, Ano IV (48): 9-29.

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 and Mining Sciences* 41: 3-19.

Caldeira, L. (2005). Metodologias de análise de risco. In: *Aplicações em Geotecnia. II Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia*. LNEC, Lisboa, 25 pp.

Cargill, J. S. & Shakoor, A. (1990). Evaluatyion of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 53:97-103.

Cargill, J.S. & Shakoor, A. (1990). Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 27: 495–503.

Carvalho, J. M. (2006). Prospecção e pesquisa de recursos hídricos subterrâneos no Maciço Antigo Português: linhas metodológicas. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 292 pp.

Carvalho, J. M. & Chaminé, H. I. (2004). O papel da fracturação e da alteração profunda em estudos de prospecção hidrogeológica: os casos das regiões de Oliveira de Azeméis e de Fafe (Maciço Ibérico, NW de Portugal). *Geociências, Rev. Univ. Aveiro*, 16: 13-31.

Carvalho, J.M.; Espinha Marques, J.; Afonso, M.J. & Chaminé, H.I. (2007). Prospecção e pesquisa de recursos hidrominerais e de água de nascente no Maciço Antigo Português. *Boletim de Minas*, 42,2: 161-196 pp.

CERF [Civil Engineering Research Foundation]. (1994). *Geo-engineering: a vision for the 21st Century*. CERF Report #94-5020, Washington, 40 pp.

CFCFF – Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow (1996). *Rock fractures and fluid flow: contemporary understanding and applications*. National Research Council, National Academy Press, 568 pp.

Chaminé, H.I. (2010). A técnica de amostragem linear em estudos geológico-estruturais e de geoengenharia de maciços rochosos (Sumário da Lição). Relatório do sumário da Lição elaborado para efeitos de prestação de provas públicas para obtenção do título académico de Agregado, no ramo de Geociências (Mecânica das Rochas), pela Universidade de Aveiro. 69 pp., 1 anexo.

Chaminé, H.I.; Afonso, M.J.; Santos Silva, R.; Moreira, P.F.; Teixeira, J.; Trigo, J.F.; Monteiro, R.; Fernandes, P. & Pizarro, S. (2010). Geotechnical factors affecting rock slope stability in Gaia riverside (NW Portugal). In: Williams A.L., Pinches G.M., Chin C.Y., McMorran T.J. & Massey C.I., eds., *Proceedings of the 11th Congress of the International Association for Engineering Geology, IAEG'2010, Geologically Active*, Auckland, New Zealand. CRC Press: Taylor & Francis Group. pp. 2729-2736.

Chaminé, H. I. & Gaspar, A. F. (1995). Estudo da compartimentação de maciços rochosos pela técnica de amostragem linear. Aplicação a uma travessa da Mina de carvão de Germunde Estudos, Notas & Trabalhos Inst. Geol. Min., Porto, 37:97-111.

Chaminé, H.I.; Afonso, M.J. & Ramos, L. in press. Scanline sampling techniques for rock engineering surveys: insights from intrinsic geologic variability and uncertainty. In: IAEG Congress, Torino, Italy (in press).

Coates, D.F. (1967). Rock mechanics principles. Mines Branch Monograph 874, Ottawa.

Coelho Dias G.J.A., 2010. Tibães: o encanto da Cerca, o silêncio dos monges e os últimos abades gerais dos beneditinos. Museu de S. Martinho de Tibães / Mosteiro de S. Bento da Vitória. 116 p.

Conde L., Pereira V., Ribeiro A. & Thadeu D., 1971. Jazigos hipogénicos de estanho e volfrâmio. Livro guia da excursão nº 7 do I Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica. Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos, Lisboa. 81 p.

Cotelo Neiva J.M., 1944. Jazigos portugueses de cassiterite e de volframite. Comun. Serv. Geol. Portg, Lisboa, 25: 1-255.

Cunha, A.P. & Muralha, J. (1990). Scale effects in the mechanical behaviour of joints and rock masses. Memória 763, LNEC, Lisboa. 44 pp.

Dearman, W.R. & Eyles, N. (1982). An engineering geological map of the soils and rocks of United Kingdom. Bulletin IAEG, 25: 3-18.

Deere, D.U. (1963). Technical description of rock cores for engineering purposes. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, 1(1): 16-22.

Deere, D.U. (1963). Technical description of rock cores for engineering purposes. In: Rock mechanics and engineering geology, Vienna, Springer, 1(1): 1-18.

Deere, D.U. (1989). Rock quality designation (RQD) after twenty years. U.S. Army Corps of Engineers Contract Report GL-89-1. Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS 67.

Deere, D.U. & Deere, D.W. (1988). The rock quality designation (RQD) index in practice. In: Kirkaldie L., ed., Rock classification systems for engineering purposes, , ASTM Special Publication, Philadelphia, 984: 91-101.

Deere, D.U. & Deere, D.W. (1988). The RQD index in practice. In: Proceedings Symposium Rock Classifications Engineering Purposes, ASTM Special Technical Publications 984: 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: C. Fairhurst, (ed.), Failure and breakage of rock, proceeding 8th U. S. symposium rock mechanics. Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrol. Engrs., pp. 237-302.

Deere, D.U., Hendron A.J., Patton F.D. & Cording E.J. (1967). Design of surface and near surface constructions in rock. In: C. Fairhurst (ed.), Proceedings 8th U.S. Symposium Rock Mechanics, New York, AIME, pp. 237-302.

Desio, A. (1949). *Geologia applicata all'ingegneria*. Editore Ulrico Hoepli. 851 pp.

Dias Costa M.J. 2002. A cerca do mosteiro de São Martinho de Tibães. *Património e Estudos*, IPPAR, Lisboa. 2: 86-95.

Dinis da Gama, C. (1991). Qualidade e patologia de obras geotécnicas. In: 4º Congresso Nacional de Geotecnia. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa, 3: 1-20.

Dinis da Gama, C. (1995). Aspectos geotécnicos y de fracturación en la explotación de Canteras. In: López.

Dinis da Gama, C. (1995). Aspectos geotécnicos y de fracturación en la explotación de canteras. In: López Jimeno, C. (Ed.). Cap. 10 del Manual de Rocas Ornamentales. Entorno Gráfico. S.L., Madrid, pp. 231-246.

Einstein, H.H. (1991). Observation, quantification and judgement: Terzaghi and engineering geology. *J. Geotech. Eng.*, 117(11): 1772-1778.

Farinas de Almeida A., 1946. A indústria mineira na economia nacional. *Revista da Faculdade de Engenharia*, 12(1): 1-16.

Ferreira N., Dias G., Meireles C. & Braga M.A.S. 2000. Carta Geológica de Portugal, na escala 1/50000. *Notícia Explicativa da Folha 5- D (Braga)*. 2ª edição. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa, 68 p.

Ferrer, M. & González de Vallejo, L. (2007). *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos*, 124 pp.

Flor Pereira S. (2010). *Inventário das minas de água da área do Mosteiro de Tibães: proposta preliminar de hidrogeo-itinerários*. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 123 pp. (Tese de Mestrado).

Fonseca A.N. Jr., 1943. Adicional ao plano de lavra da mina de volfrâmio Tibais: memória descritiva. 3 p. (relatório inédito).

Fonseca, L. (2008). *Interacção e avaliação entre o maciço rochoso e as tecnologias de perfuração: consequências técnico-económicas*. Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP. (tese de mestrado).

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).

Fontes L., 2005. São Martinho de Tibães, um sítio onde se fez um mosteiro: ensaio em Arqueologia da Paisagem e da Arquitectura. Instituto Português do Património Arquitectónico. 215 p.

Fookes, P.G; Lee, E.M. & Griffiths, J.S. (2007). Engineering geomorphology: theory and practice. Whittles, Caithness, 279 pp.

Freeze, A.R. & Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice-Hall. 604 pp.

Freire D., 2001. A febre do volfrâmio. História, 37 (III Série, Ano XXIII): 38-43.

Freitas, M.H. (1994). Teaching and training in engineering geology: professional practice and registration. In: Oliveira R., Carvalho-Rodrigues J.A., Gomes Coelho & Cunha P., eds., Proceedings 7th Congress of the International Association of Engineering Geology, Lisbon, Balkema, 6: 62-75.

Freitas, M.H. (2009). Geology: its principles, practice and potential for geotechnics. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 42: 397-441.

Galiza, A.C.; Ramos, L.; Fonseca, L. & Chaminé, H.I. (2011a). Geotecnia mineira de maciços rochosos fracturados para o controlo da qualidade do desmonte. Revista Ingenium da Ordem dos Engenheiros, 124 (Jul/Agos): 76-80.

Galiza, A.C.; Ramos, L.; Fonseca, L.; Teixeira, J. & Chaminé, H.I. (2011b). O papel da geotecnia mineira na otimização do desmonte de maciços rochosos fraturados. Boletim de Minas, DGEG, Lisboa, 46(2): 103-120.

Galiza, A.C.; Ramos, L.; Fonseca, L. & Chaminé, H.I. (2011c). Geomechanical control of jointed rock mass blasting by aligned drilling. In: Holmberg R. (ed.), Lisbon Conference Proceedings 2011, EFEE – European Federation of Explosives Engineers, pp. 271-280.

Galiza, A.C. (2013). Qualidade e optimização do desmonte de maciços rochosos em geotecnia mineira. Universidade de Aveiro. (tese de doutoramento).

Gates, W.C.B. (1995). The hydro-potential (HP) value: a proposed rock classification technique for evaluation of the groundwater potential in fractured bedrock. In: Abstracts from the 1st symposium on the hydrogeology of Washington State: Washington Department of Ecology, pp. 142.

Gates, W.C.B. (1997). The hydro-potential value: a rock classification technique for examination of groundwater potential in fractured bedrock. Environ Eng Geosci 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.

Gerbella L. 1947. Arte mineraria. Terza Edizione, Volume I, Editore Ulrico Hoepli, Milano.

González de Vallejo, L. (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. (2003). SRC Rock Mass Classification of tunnels under high tectonic stress excavated in weak rocks. *Engineering Geology*, 69: 273-285.

González de Vallejo, L.I. & Ferrer, M. (2011). *Geological engineering*. CRC Press, Taylor-Francis group, 725 pp.

Goodman, R.E. & Smith, H.R. (1980). RQD and fracture spacing. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 106: 191-193.

Griffiths, J. S. (2002). *Mapping in Engineering Geology. Key Issues in Earth Sciences. The Geological Society of London*, 1, 287 pp.

Grimstad, E. & Barton, N. (1993). Updating of the Q-System for NMT. In: Kompen, 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. pp. 46-66.

Griffiths, J.S. & Stokes, M. (2008). Engineering geomorphological input to ground models: an approach based on Earth systems. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 41: 73-91.

GSE - Geological Society Engineering Group Working Party Report. (1995). The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology, Geological*.

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.

Gunsallus, K. L. & Kullhawy, F. N. (1984). A comparative evaluation of rock strength measures. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr*, 21: 233-248.

Hamm, S.; Kim, M.; Cheong, J.; Kim, J.; Son, M. & Kim, T. (2007). Relationship between hydraulic conductivity and fracture properties estimated from packer tests and borehole data in a fractured granite. *Engineering Geology*, 92: 73-87.

Harp, E.L. & Noble, M.A. (1993). An engineering rock classification to evaluate seismic rock-fall susceptibility and its application to the wasatch front. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 30(3): 293-319.

Harrison, J.P. (1999). Selection of the threshold value in RQD assessments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36(5): 673-685.

Hatheway, A.W.; Kanaori, Y.; Cheema, T.; Griffiths, J. & Promma, K. (2004). 9th Annual Report of the Status of Engineering Geology, year 2003-4: encompassing hydrogeology, environmental geology and the applied geosciences. *Engineering Geology*, 74: 1-31.

Hencher, S.R. (1987). The implications of joints and structures for slope stability. In: *Slope Stability Geotechnical Engineering and Geomorphology*, John Wiley & Sons, New York. pp. 146-155.

Hoek, E. (1966). Rock mechanics an introduction for the practical engineer Parts I, II and III (April, June and July 1966). *Mining Magazine*. 67 pp.

Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masses. *News Journal of ISRM*, 2, 2: 4-16.

Hoek, E. (2007). *Practical rock engineering*. RocScience: Hoek's Corner, 342 pp.

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. & Brown, E.T. (1980a). *Underground excavations in rock*. Institution of Mining and Metallurgy, London, 627 pp.

Hoek, E. & Brown, E.T. (1980b). Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Eng., ASCE* 106 (GT9): 1013-1035.

Hoek, E.; Carranza-Torres, C. & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion: 2002 edition. *Proceedings of the NARMS-TAC Conference, Toronto*, 1: 267-273.

Hoek, E.; Marinos, P. & Benissi, M. (1998). Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: the case of the Athens Schist Formation. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 57(2): 151-160.

Hoek, E. & Marinos, P. (2000). Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. *Tunnels and Tunnelling International*. Part 1 – November 2000, Part 2 – December 2000.

Hoek, E. & Marinos, P. (2007). A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. *Soils and Rocks: Int. J. Geotech. Geoenv. Eng.*, 30(2): 85-92.

Hoek, E.; Wood, D. & Shah, S. (1992). A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses. In: Hudson J.A., ed., *Proceedings of the Rock Characterization, Symp. Int. Soc. Rock Mech., Eurock '92*, pp. 209-214.

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. (1992). *Rock engineering systems: theory and practice*. Ellis Horwood, New York. 185 pp.

Hudson, J.A. & Cosgrove, J.W. (1997). Integrated structural geology and engineering rock mechanics approach to site characterization. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 34(3/4): p136.1-p136.15.

Hudson, J.A. & Harrison, J.P. (2000). *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*. 2nd edition, Pergamon Press. 444 pp.

Hudson, J. A. & Priest, S. D. (1983). Discontinuity frequency in rock masses. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 20: 73-89.

IAEG – International Association for Engineering Geology. (1976). *Guide pour la préparation des cartes géotechniques*. Sciences de la Terre. Les Presses de l'Unesco, Paris. 79 pp.

IAEG – International Association Engineering Geology. (1981a). Recommended symbols for engineering geological mapping. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 24: 227-234.

IAEG – International Association Engineering Geology. (1981b). Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 24: 235-274.

ISRM – International Society for Rock Mechanics. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 15(6): 319-368.

ISRM – International Society for Rock Mechanics. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 15, 6: 319-368.

ISRM – International Society for Rock Mechanics. (1981). Basic geotechnical description of rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 18: 85-110.

ISRM – International Society for Rock Mechanics. (1985). Suggested method for determining point load strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 22: 51-60.

ISRM – International Society for Rock Mechanics. (2007). The complete ISRM suggested methods for characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In: Ulusay R. & Hudson J.A., eds., *suggested methods prepared by the commission on testing methods, ISRM*. Ankara, Turkey. 628 pp.

Jaeger, C. (1979). *Rock mechanics and engineering*. 2nd Edition. Cambridge University Press. 523 p.

Jakubec, J. and Laubscher, D.H. (2000) The MRMR rock mass rating classification system in mining practice, *MassMin 2000*, Brisbane, Queensland, AusIMM, pp. 413-421.

Keaton, J. (2013). Engineering geology: fundamental input or random variable?. In Withiam J.L., Phoon K.-K., Hussein M. (ed.), *Foundation Engineering in the Face of Uncertainty: Honoring Fred H. Kulhawy*. ASCE. GSP 229. pp. 232-253.

Kendorski, F.; Cummings, R.; Bieniawski, Z.T. & Skinner, E. (1983). Rock mass classification for block caving mine drift support. In: *Proceedings of the 5th congress Int. Soc. Rock Mech.*, Melbourne, Rotterdam, Balkema. pp. B51-B63.

LABCARGA – Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada. (2007/08). *Mina das Azeleiras: estudo geológico-geotécnico e projecto da estrutura de reforço e de protecção*. Relatório para o Mosteiro de S.

Martinho de Tibães, Instituto Português do Património Arquitectónico. Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada, Instituto Superior de Engenharia do Porto. 5 volumes + 4 anexos. (relatório inédito).

Lage M.O.P., 2002. Wolfram = volfrâmio: terra revolvida, memória revolta. Para uma análise transversal da sociedade portuguesa (anos 1930-1960). Monografias, Publicações do Núcleo de Estudos de População e Sociedade, Instituto de Ciências Sociais da Universidade do Minho, Braga, 838 p.

Lagoa A.M., 1941. Mina de wolframite de Tibais, plano de lavra: memória descritiva e justificativa. 4 p. + 5 mapas/perfis em anexo. (relatório inédito).

Lassner E. & Schubert W.D., 2005. The history of tungsten (wolfram). Part I: The birth of the element and the early days of exploration. ITIA Newsletter, London. p. 6-11.

Laubscher, D.H. (1975). Class distinction in rock masses, Coal, Gold, Base Minerals, vol.23, In: Laubscher, D.H. and Jakubec, J. (2000) The IRMR/MRMR rock mass classification for jointed rock masses, SME 2000, pp. 475-481.

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.

Laubscher, D.H. and Taylor, H.W. (1976). The importance of geomechanics classification of jointed rock masses in mining operations, Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, South Africa, In: Laubscher, D.H. and Jakubec, J. (2000). The IRMR/MRMR rock mass classification for jointed rock masses, SME 2000, 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.).

Lauffer H. (1988). Zur Gebirgsklassifizierung bei Frasnortrieben. Felsbau, 6: 137-149.

Leal Gomes, C. & Gaspar, O., 1992. Mineralizações filonianas associadas a cisalhamentos pós-pegmatóides do campo aplito-pegmatítico de Arga-Minho. Comun. Serv. Geol. Portg, 78(1): 31-47.

Leal Gomes, C., Meireles, C. & Castro, P., 1997. Estudo preliminar sobre a natureza poligénica de turmalinitos das Unidades de Valença-Vila Nune e Minho Central-Occidental (NW de Portugal): I. análise estrutural e paragenética. In: Pires, C. C.; Gomes, M. E. P. & Coke, C. (coords.), Comunicações da XIV Reunião de Geologia do Oeste Peninsular, UTAD, Vila Real. p. 85-90.

Li C.K. & Wang C., 1943. Tungsten, its history, geology, ore-dressing, metallurgy, chemistry, analysis, applications, and economics. American Chemical Society Monograph Series, Nº. 94, New York, Reinhold Pub. Corp., 344 p.

Li, L.; Ouellet, S. & Aubertin, M. (2009). An improved definition of rock quality designation, RQDc. In: Diederichs M. & Grasselli G., Eds., Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium ROCKENG09, Toronto, Paper 3934, pp. 1-10.

Lisle, R. J. & Leyshon, P. R. (2004). Stereographic projection techniques for geologists and civil engineers. Second Edition, Cambridge University Press. 112 pp.

Lopes, M.E. (2012). Geoconservação e valorização do património geológico-mineiro de espaços subterrâneos antigos. Universidade de Coimbra, 329pp. (Tese de doutoramento).

Lopes, M.E.; Meixedo, P.; Neto, E.P.; Gama Pereira, L.C.; Gomes, A.; Afonso, M.J.; Dias Costa, M.J.; Trigo, J.F. & Chaminé, H.I. (2008). Metodologias interdisciplinares em estudos de geoconservação de património geológico-mineiro: o caso da antiga mina de volfrâmio das Aveleiras (Mire de Tibães). In: Actas do V Seminário de Recursos Geológicos, Ambiente e Ordenamento do Território, UTAD, Vila Real, pp. 91-97.

Madureira, M. (2012). Geotecnia dos túneis do maciço de Paranhos: avaliação hidrogeomecânica exploratória. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Tese de mestrado).

Mandl, G. (2005). Rock joints: the mechanical genesis. Springer-Verlag. 221 pp.

Manoliu, I. & Radulescu, N. [eds.]. (2008). Education and Training in Geo-Engineering Sciences: Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Engineering Geology, Rock Mechanics: Routledge, Taylor and Francis Group, 526 p.

Maranha das Neves, E. (1994). Estados limites e segurança em Geotecnia. Geotecnia, Rev. Soc. Portg. Geotecnia, Lisboa, 72: 5-62.

Marinos, P.G. & Hoek, E. (2000). GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Proceedings GeoEng2000 on Geotechnical and Geological Engineering (Melbourne, Victoria, Australia). Lancaster, PA: Technomic Publishers, pp. 1422-1442.

Marinos, P. & Hoek, E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. Bulletin of the Engineering Geology & the Environment (IAEG), 60: 85-92.

Marinos, P.; Hoek, E. & Marinos, V. (2006). Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunnelling. Bull. Eng. Geol. Env., 65/2: 129-142.

Marinos, P.G.; Marinos, V. & Hoek, E. (2007). The geological strength index (GSI): a characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. In: Mark C., Pakalnis R. & Tuchman R.J., eds., Proceedings of the International Workshop on Rock Mass Classification in Underground Mining. pp. 87-94.

Marinos, V.; Marinos, P.G. & Hoek, E. (2005). The geological strength index: applications and limitations. *Bull. Eng. Geol. Environ*, 64: 55-65.

Martinez de Lima D., 1953. *Wo3 a febre do volfrâmio: episódio nortenho da Grande-Guerra 1939-1945*. Diogo Lima edição, Porto. 22 p.

Martins M., Freitas I. V. & Val Valdivieso M. I. del [coords.], 2012. *Caminhos da água: paisagens e usos na longa duração*. CITCEM, Braga. 293 p.

Martins, R.; Moreira, P.; Pereira, C.S.; 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, pp. 255-264.

Mata A.M.R. & Dias Costa M.J., 1998a. *Cerca do Mosteiro de Tibães*. Prémio Internacional Carlo Scarpa para o Jardim (org. versão portuguesa). Lisboa, Fondazione Benetton Studi Ricerche / Instituto Português do Património Arquitectónico.

Mata A.M.R. & Dias Costa M.J., 1998b. *Natureza, memória, vida nova na Cerca do Mosteiro de Tibães*. In: Prémio Internacional Carlo Scarpa para o Jardim. Instituto Português do Património Arquitectónico, Mosteiro S. Martinho de Tibães, pp. 8-25.

Mata A.M.R. & Oliveira P., 2004. O processo de extinção do Mosteiro de São Martinho de Tibães. *Património Estudos, IPPAR*, 7: 101-111.

Mata A.M.R., Ramos A. & Soares M.J., 2000. *Manuscritos da livraria do mosteiro de São Martinho de Tibães*. *Fórum*, 27: 69-124.

Matos Fernandes, M. (2000). Eurocódigo 7: questões essenciais e ponto da situação. VII Congresso Nacional de Geotecnia, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Mazzoccola, D.F.; Millar, D.L. & Hudson, J.A. (1997). Information, uncertainty and decision making in site investigation for rock engineering. *Geotechnical and Geological Engineering*, 15: 145-180.

Medley, E. (1999). Systematic characterization of melange bimrocks and other chaotic soil/rock mixtures. *Felsbau: Rock and Soil Engineering – Journal for Engineering Geology, Geomechanics and Tunnelling*, 3: 152-162.

Meireles C., Castro P. & Pereira E., 1997. *Novos dados litostratigráficos, estruturais e metamórficos do Paleozóico da região de Braga*. In: Pires, C. C.; Gomes, M. E. P. & Coke, C. (coords.), *Comunicações da XIV Reunião de Geologia do Oeste Peninsular*, UTAD, Vila Real, p. 301-304.

Meixedo, J.P.; Lopes, M.E.; Dias, Costa M.J.; Trigo, J.F.C. & Chaminé, H.I. (2011). Geological and mining heritage in NW Portugal (Mire de Tibães): threats and opportunities for a sustainable second life-cycle. In: Cloughton P. & Mills C. (eds.), *Mining Perspectives: Proceedings of the 8th International Mining History*

Congress. Cornwall and West Devon Mining Landscape World Heritage Site, Cornwall Council, Truro, p. 97-103.

Mello Mendes, F. (1980a). A teoria e prática em mecânica das rochas. Reflexões sobre vinte anos de experiência profissional, 1ª parte. *Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 29: 25-63.

Mello Mendes, F. (1980b). A teoria e prática em mecânica das rochas. Reflexões sobre vinte anos de experiência profissional, 2ª parte. *Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 30: 3-59.

Miller, R.P. (1965). Engineering classification and index properties for intact rock. PhD Thesis, University of Illinois, 282 pp.

Milne, D.; Hadjigeorgiou, J. & Pakalnis, R. (1998). Rock mass characterization for underground hard rock mines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13(4): 383-391.

Miranda, T.; Gomes Correia, A. & Ribeiro e Sousa, L. (2006). Determinação de parâmetros geomecânicos em formações rochosas e maciços heterogêneos. *Revista Engenharia Civil, UM*, 25: 17-40.

Nash J., 1993. We eat the mines and the mines eat us. Dependancy and exploitation in bolivian tin mines. Columbia University Press (Revised edition), New York, 363 pp.

Neto, E.P. (2007). Estudo geológico e geomecânico em antigas explorações mineiras: o caso da mina das Aveleiras. Universidade de Aveiro. (Tese de Mestrado).

Nogueira A.M., 1941. Elementos para o estudo da indústria mineira em Portugal nos anos de 1930 a 1939. *Boletim de Minas*, 6: 3-93.

Nunes J.P.A., 2001/2002. A indústria mineira em Portugal Continental desde a consolidação do regime liberal ao I Plano de Fomento do Estado Novo (1832-1953): um esboço de caracterização. *Revista Portuguesa de História*, 35: 421-464.

Monticelli, J.J. (1984). Influência da compartimentação geológico-geotécnica de maciços rochosos no projeto de fundações de barragens: fase de viabilidade. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo. 149 pp.

Müller, L. (1963). *Der Felsbau*. volume 1. Enke, Stuttgart, 624 pp.

Müller, L. (1969). Fundamentals of rock mechanics. Courses and lectures, International Centre for Mechanical Sciences, 8: 1-73.

Nascimento, U. (1990). Contribuição para a história da Geotecnia em Portugal. *Geotecnia, Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, Lisboa, 58: 3-16.

NGI [norwegian geotechnical institute]. (2013). Using the Q-system: Rock mass classification and support design. NGI handbook, Oslo, 56 pp.

Nicholson, G. A.; Bieniawski, Z. T. (1990). A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification. *International Journal of Min Geology Eng.* 181–202.

Norbury, D. R. (1986). The Point Load Test. Engineering Geology Special Publications. Geological Society, London, 2: 325-329.

Oliveira A.A., 1974. A abadia de Tibães e o seu domínio (1630-1680): estudo social e económico. Publicações da Faculdade de Letras do Porto. Universidade do Porto, 406 p.

Oliveira, R. (1986). Geologia de engenharia e mecânica das rochas. Conceitos fundamentais. Metodologia de estudo de maciços rochosos. In: Simpósio Sul Americano de Mecânica das Rochas. Porto Alegre, Brasil.

Oliveira, R. (1987). Engineering geological investigations of rock masses for Civil Engineering projects and mining operations. Memória LNEC, Lisboa, 693: 1-28.

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 PhD Thesis, University of Oslo, 400 p. (Tese de doutoramento).

Palmström, A. (1996). Characterization of rock masses by the RMI for use in practical rock engineering. Tunnel Underground Space Technol., vol. 11, No. 2, pp. 175-186 (part 1); Vol. 11, No 3, pp. 287-303 (part 2).

Palmström, A. (2009). Combining the RMR, Q, and RMI classification systems. Tunnelling and Underground Space Technology, 24(4): pp. 491-492.

Palmström, A. & Stille, H. (2010). Rock engineering. Thomas Telford Ltd., 408 pp.

Peacock, D. C. P. (2006). Predicting Variability in joint frequencies from boreholes. J. Structural Geology, 28: 353-361.

Peacock, D.C.P.; Harris, S.D. & Mauldon, M. (2003). Use of curved scanlines and boreholes to predict fracture frequencies. J. Struct. Geol., 25: 109-119.

Pereira, R. (2012). Estudo da antiga mina de volfrâmio das Azeleiras (Mire de Tibães): cartografia geotécnica e avaliação geomecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 147 p. + anexos (Tese de mestrado).

Peres Rodrigues, F.M. (1977). Anisotropia das rochas e dos maciços rochosos (I volume). Memória LNEC, Lisboa, 483: 1-244.

Personda – Sociedade de Perfurações e Sondagens. (1994). Estudo hidrogeológico da Cerca do Mosteiro de Tibães, em Braga. Relatório final para o IPPC, Personda – Sociedade de Perfurações e Sondagens, Lda., Lisboa, 27 pp. + anexos (relatório inédito).

Pousada R.V., 1947. Relatório de novo reconhecimento da mina de volfrâmio denominada Tibais, situada na freguesia de Mire Tibais. 4 p. (relatório inédito).

Price, D.G. & Freitas, M.H. (2009). Engineering geology: principles and practice. Springer, 450 pp.

Price, D.J. (2009). Engineering geology: principles and practice. Springer, 450 pp.

Priest, S.D. (1993). Discontinuity analysis for rock engineering. Kluwer Academic Publishers. 473 pp.

Priest, S.D. (1993). Discontinuity analysis for rock engineering. Chapman and Hall. London, 473 pp.

Priest, S.D. & Hudson, J.A. (1976). Discontinuity spacings 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.

Ragan, D.M. (2009). Structural geology: an introduction to geometrical techniques. Fourth Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 602 pp.

Ramos, L. (2008). Avaliação geotécnica e geomecânica de maciços rochosos fracturados para o controlo da qualidade do desmonte. Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP. (Tese de mestrado).

Ramos T.M. (2009). Ensaios geomecânicos em rochas metassedimentares do maciço da mina das Aveleiras (Mosteiro de Tibães): comparação, potencialidades e limitações. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 217 pp. (Tese de Mestrado).

Ribeiro A. & Pereira E., 1982. Controlos paleogeográficos, petrológicos e estruturais na génese dos jazigos portugueses de estanho e volfrâmio. Geonovas, Rev. Ass. Portg. Geol., Lisboa, 1/3: 23-31.

Ribeiro e Sousa, L. (2004). Acidentes e danos associados a obras subterrâneas. Geotecnia, Rev. Soc. Portg. Geotecnia, Lisboa, 100: 334-344.

Riedmüller, G. & Schubert, W. (1999). Critical comments on quantitative rock mass classifications. Felsbau 17(3): 164-167.

Ritter, W. (1879). Die Statik der Tunnelgewölbe. Springer, Berlin.

Rocha, M. (1981). Mecânica das Rochas. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 445 pp.

Romana, M. (1985). New adjustment rating for application of the Bieniawski classification to slopes. In: Proceedings Int. Symp. Rock Mechanics Mining Civ. Works. ISRM, Zacatecas, Mexico, 59-63.

Romana, M. (1993). A geomechanical classification for slopes: Slope mass rating. In: Hudson J., Ed., Comprehensive Rock Engineering, Pergamon, 3: p. 575-600.

Romana, M. (1995). The geomechanical classification SMR for slope correction. Proceedings 8th Int. Congress Rock Mechanics, ISRM, Tokyo. 3: p. 1085-1092.

Romana, M. (2003). DMR, a new geomechanics classification for use in dams foundations, adapted from RMR. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid. 9 pp.

Romana M., 2003. DMR (Dam Mass Rating): an adaptation of RMR geomechanics classification for use in dams foundations. In: Proceedings on International Congress on Rock Mechanics, ISRM, South Africa. 4 pp.

Romana, M. (2004). DMR (an adaptation of RMR), a new geomechanics classification for use in dams foundations. In: Actas do 9º Congresso Luso de Geotecnia. Aveiro. 12 pp.

Scesi L. & Gattinoni P. (2009). Water circulation in rocks. Springer, Dordrecht, 165 pp.

Schmidt, E. (1951). A non-destructive concrete tester. Concrete, 59 (8): p. 34-35.

Sem, Z. (1984). RQD models and fracture spacing. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 110: p. 203-216.

Sem, Z. (1990). Cumulative core index for rock quality evaluations. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 27(2): p. 87-94.

Serafim, J.L. & Pereira, J.P. (1983). Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski. Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and Underground Constructions, p. 1133-1144.

Silva Cardoso, A. (2004). Modelação e segurança. In: 9º Congresso Nacional de Geotecnia, Aveiro. Sociedade Portuguesa de Geotecnia.

Simões Cortez J.A., 1965. Métodos de exploração por desabamento (exposição crítica). Estudos Notas e Trabalhos do Serviço Fomento Mineiro, 37(1-2): 5-338.

Singh, B. & Goel, R. K. (1999). Rock mass classification: a practical approach in civil engineering. Elsevier. 250 pp.

Singh, B. & Goel, R.K. (2011). Engineering rock mass classification: tunneling, foundations, and landslides. Butterworth-Heinemann, Elsevier Inc., 365 pp.

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, p. 43-64.

Snow, D.T. (1969). Anisotropic permeability of fractured media. Water Resources Research, 5(6): p. 1273-1289.

Talobre, J. (1957). La mécanique des roches appliquée aux travaux publics. Paris, Dunod.

Teixeira C., Medeiros A.C. & Macedo J.R., 1973. Carta Geológica de Portugal, na escala 1/50000. Notícia Explicativa da Folha 5- D (Braga). Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa, 57 p.

TERMARED [autores do sector N de Portugal: Carvalho, J.M., Chaminé H.I., Teixeira J., Rodrigues C., Moreira P., Santos Silva R. & Pires A.], 2011. Catálogo de águas termais do espaço SUDOE / Catálogo de nascentes termais do espaço SUDOE / Catalogue des sources thermales de l'espace SUDOE. Programa de Cooperação Territorial do Espaço Sudoeste Europeu (SUDOE), Xunta de Galicia, Santiago de Compostela, 135 p.

Terzaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage* [Earthwork mechanics based on the physics of soils]. Franz Deuticke, Leipzig-Wien. 399 pp.

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, New York. 528 pp.

Terzaghi, K. (1946). Rock defects and loads in tunnel supports. In: Proctor R.V. & White T.L., eds., *Rock tunneling with steel supports*, Ohio, p. 17-99.

Terzaghi, K. (1946). Rock defects and locals on tunnel supports. In: In: Proctor R.V. & White T.L., eds, *Rock tunnelling with steel supports*, The Commercial Shearing & Stamping Co.. Youngstown, Ohio, 1: 17-99.

Terzaghi, K. & Peck, R. (1987). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley and Sons Inc., New York.

Terzaghi, K.; Peck, R.B. & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. 3rd edition, Wiley-Interscience. 592 pp.

Terzaghi, R.D. (1965). Sources of errors in joint surveys. *Geotéchnique*, 15(3): p. 287-304.

Trigo, J.F.C.; Chaminé, H.I.; Afonso, M.J.; Almeida, H.; Lopes, M.E.; Teixeira, J.; Pereira, R.; Pinheiro, R.; Meixedo, J.P.; Gomes, A.; Teixeira, J.F.A. & Dias Costa, M.J. Valorização do património geológico-mineiro: a antiga mina das Aveliras (Mosteiro de Tibães). *Revista Ingenium, Ordem dos Engenheiros*, Lisboa. (submetido)

Vardakos, S. (2004). A rock mass classification tool for personal digital assistants. The Charles E. Via Jr. Department of Civil and Environmental Engineering. Geotechnical Engineering Group. Blacksburg, Virginia. 61 pp.

Vidal-Romani, J.R. & Twidale, C.R. (1999). Sheet fractures, other stress forms and some engineering implications. *Geomorphology*, 31(1-4): 13-27.

Vilar A., 2008. O volfrâmio de Arouca no contexto da segunda guerra mundial. 2ª edição. Câmara Municipal de Arouca, 290 p.

Wang, H.F. (2000). Theory of linear poroelasticity with applications to geomechanics and hydrogeology. Princeton University Press, 276 pp.

Wickham, G.E.; Tiedemann, H.R. & Skinner, E.H. (1972). Support determination based on geologic predictions. In: K.S. Lane & L.A. Garfield, (eds), Proceedings of the 1st North American Rapid Excavation Tunneling Conference (RETC), Chicago. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), New York, pp. 43-64.

Wickham, G.E.; Tiedemann, H.R. & Skinner, E.H. (1974). Ground support prediction model: RSR concept. In: Proceedings 2nd North American Rapid Excavation & Tunnelling Conference (RETC), San Francisco. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME), New York, pp. 691-707.

Wittke, W. (1990). Rock mechanics: theory and applications with case histories. Springer-Verlag, Berlin, 1076 pp.

Zuquette, L. V. & Gandolfi, N. (2004). Cartografia geotécnica. Oficina de textos, Brasil, 198 pp.

Anexos

Anexo I

**MGC-RocDesign | Calc (*Mining Geomechanics
Classification systems for rock engineering design*)**

Ver CD-ROM em anexo