



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA



Cartografia de zonamento geotécnico em frentes de escavação de maciços rochosos heterogêneos (túnel do Marão): aplicação da classificação geomecânica GSI | 2013

Cláudio Manuel Morgado da Santa



2015

(página propositadamente em branco)



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Cartografia de zonamento geotécnico em frentes de escavação de maciços rochosos heterogéneos (túnel do Marão): aplicação da classificação geomecânica GSI | 2013

Cláudio Manuel Morgado da Santa

1130207

*Projecto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizado sob a orientação do Professor Doutor Helder I. Chaminé, Professor Coordenador com Agregação do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

(página propositadamente em branco)

Júri

Presidente

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

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

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

Doutora Maria Isabel Gonçalves Fernandes
Professora Auxiliar, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Mestre Luís Carlos Correia Ramos
Director de Produção do Grupo Elevo SA, Porto
Assistente convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

(página propositadamente em branco)

A tese de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente** (MEGG) foi apresentada e defendida em prova pública, pelo Licenciado **Cláudio Manuel Morgado da Santa**, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 09 de Novembro de 2015 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **18 (dezoito) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.

(página propositadamente em branco)

*Dedico esta tese a meus Pais,
exemplos de superação e
sacrifício...*

(página propositadamente em branco)

Agradecimentos

Expresso o meu profundo agradecimento a todos quantos que contribuíram directa ou indirectamente para a conclusão desta importante etapa, agradecendo em particular:

- Ao Professor Helder I. Chaminé (DEG|ISEP), meu orientador, um agradecimento especial pela constante disponibilidade e dedicação no acompanhamento de todas as etapas deste estudo. Pela constante troca de ideias, pelos ensinamentos transmitidos, pela confiança que sempre me transmitiu e por ser um exemplo de sabedoria e de humildade na busca de conhecimento.
- Ao Centro de Prestação de Serviços Especializados Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (Labcarga|ISEP) do Instituto Superior de Engenharia do Porto, na pessoa do seu director Prof. Doutor Helder I. Chaminé, por todas as facilidades concedidas na utilização dos recursos do laboratório, bem como na partilha de informação cartográfica e bibliográfica fundamental ao desenvolvimento deste trabalho.
- À Infraestruturas de Portugal a autorização para o desenvolvimento deste trabalho na empreitada de construção do Túnel do Marão.
- A EPOS, SA por me dar a oportunidade de fazer o que mais gosto em termos geo-profissionais, ao mesmo tempo que pude desenvolver a minha formação académica em engenharia geotécnica.
- Ao André Nogueira e à Jordana Almeida, Amigos e colegas de equipa no exigente desafio da empreitada do Túnel do Marão; pelo companheirismo e ajuda nos levantamentos de campo.
- Ao Dr. Luís Gonçalves, além de superior hierárquico é um Amigo, pelo seu constante incentivo e apoio, pela constante troca de ideias que me obrigam a evoluir diariamente.
- Ao Dr. Paulo Barbosa pelas conversas e trocas de ideias acerca da classificação de maciços rochosos.
- Ao Eng.º Rui Luis a cedência de fotografias da empreitada do seu arquivo pessoal.
- Ao Professor Doutor Carlos Coke (UTAD) pela disponibilização de documentação cartográfica vária da sua tese de doutoramento sobre a região do Marão.
- À Dra. Liliana Freitas (Labcarga|ISEP) pela imprescindível ajuda na formatação do documento.
- Aos colegas Daniel Oliveira, Gustavo Mota, Joana Almeida e Rute Ribeiro, pelo bem que me receberam nesta nova “casa”, pela ajuda e companheirismo ao longo do curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente.
- À Sónia pelo constante apoio e incentivo, pela sua dedicação e paciência para as ausências e horas de estudo e de trabalho, por vezes menos bem-humoradas.
- Por último, aos trabalhadores das frentes Poente da empreitada do Túnel do Marão, exemplos de trabalho e dedicação, pela ajuda a esticar a fita, a ir buscar o projector; por esperarem “só um bocadinho” para eu acabar o levantamento...

(página propositadamente em branco)

Palavras-chave

Maçços rochosos, escavações subterrâneas, zonamento geotécnico, classificações geomecânicas, GSI

Resumo

Este estudo pretende discutir a validade da aplicação da mais recente versão do “GSI – Geological Strength Index” (Hoek et al., 2013) em maços rochosos heterogéneos por aplicação num projecto de obra subterrânea em execução. O estudo envolveu a caracterização geológica-geotécnica nas duas frentes de escavação da frente “Poente” da empreitada de construção do Túnel do Marão (N de Portugal) tendo sido cartografados 305 metros no conjunto das duas frentes em 74 avanços consecutivos. Para esta caracterização foram coligidos e uniformizados dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos relativos aos levantamentos realizados a cada avanço. A técnica da amostragem linear foi aplicada para a cartografia das discontinuidades que permitiu estabelecer o grau de compartimentação do maço rochoso. Além disso, procedeu-se a um tratamento estatístico das discontinuidades, bem como dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos associados. Os zonamentos geotécnicos e geomecânicos das secções em análise foram realizados sempre em estreita ligação com o conhecimento das características do maço in situ. Procurou-se estabelecer termos de comparação entre a versão do GSI|2013 e as versões anteriores (GSI|98, GSI|2001) por aplicação para os avanços cartografados. Pretende-se que este trabalho contribua para um maior conhecimento da mais recente versão do “Geological Strength Index” (2013) para a sua aplicabilidade em projectos de geoengenharia.

(página propositadamente em branco)

Keywords

Rock masses, underground excavations, geotechnical zoning, geomechanical classifications, GSI

Abstract

This work intends to discuss the validity of the application of the latest version of "GSI - Geological Strength Index" (Hoek et al., 2013) in heterogeneous rock masses applying it in an underground work project in progress. The study involved the geological and geotechnical characterization in both front excavation of "West" work site in Marão Tunnel ("Túnel do Marão", N Portugal) construction project and has been mapped 305 meters (summing both fronts) in 74 consecutive advances. For this characterization were collected and uniformed geological, geotechnical and geomechanical data relating to site investigations in each new advance. Scanline sampling technique on free rock-mass surfaces applied to the rock block size was on the basis of all these data. Moreover, it preceded to a statistical treatment of discontinuities, as well the geological, geotechnical and geomechanical parameters associated. Geomechanical and geotechnical zoning of the sections in question were always carried out in close relationship with the knowledge of in situ rock mass characteristics. In addition, was tested a comparison between the version of GSI|2013 and earlier versions (namely, GSI|98 and GSI|2001) by application to the investigation sites. It is intended that this work will contribute to a better understanding of the latest version of "Geological Strength Index" (2013) and is applicability in geoenvironmental projects.

(página propositadamente em branco)

Índice

1. Introdução geral	3
1.1. Enquadramento	3
1.2. Objectivos	4
1.3. Metodologias e técnicas	5
2. “Geological Strength Index”: breve síntese crítica	15
2.1. Considerações iniciais	15
2.2. Principais versões do GSI: evolução histórica	16
2.3. Estimativa das propriedades mecânicas com base no GSI	26
2.4. A influência do tipo de rocha na aplicação do GSI	31
2.5. Recomendações práticas para o uso do GSI	35
2.6. Interação com outras classificações geomecânicas e correlações	37
3. Cartografia de zonamento geotécnico baseada no GSI 2013: aplicação em frentes de escavação do Túnel do Marão	43
3.1. Apresentação do projecto “túnel do Marão”	43
3.1.1. Generalidades	43
3.1.2. Método construtivo	44
3.1.3. Sustentamento com base nas classificações geomecânicas	45
3.2. Enquadramento geológico	46
3.2.1. Geologia Regional	46
3.2.2. Litoestratigrafia	46
3.3. Levantamentos de frente de escavação na Frente Poente do Túnel do Marão	49
3.3.1. Litologia observada	49
3.3.2. Grau de Alteração e Estado da Fracturação	53
3.3.3. Diaclasamento	54
3.4. Apresentação de resultados dos levantamentos geológico-geotécnicos	64
3.5. Zonamento Geológico-Estrutural, Geotécnico e Geomecânico	67
3.5.1. Zonamento Geológico-Estrutural	68
3.5.2. Zonamento Geotécnico	68
3.5.3. Zonamento Geomecânico	81
4. Conclusões	101
5. Referências	107

Índice de Anexos

Anexo I – Exemplo de ficha de levantamento geológico-geotécnico de frentes de escavação subterrâneas (túnel do Marão) - Túnel Poente Norte, pk 15+611,50

Anexo II – Exemplo de ficha de levantamento geológico-geotécnico de frentes de escavação subterrâneas (túnel do Marão) - Túnel Poente Norte, pk 15+719,00

Anexo III – Exemplo de ficha de levantamento geológico-geotécnico de frentes de escavação subterrâneas (túnel do Marão) - Túnel Poente Sul, pk 15+737,00

Anexo IV – Exemplo de ficha de levantamento geológico-geotécnico de frentes de escavação subterrâneas (túnel do Marão) - Túnel Poente Sul, pk 15+864,00

Anexo V – Exemplo de ficha de levantamento geomecânico do martelo de Schmidt (tipo L) em frentes de escavação subterrâneas (túnel do Marão) - Túnel Poente Norte, pk 15+611,50

Anexo VI – Exemplo de ficha de levantamento geomecânico do martelo de Schmidt (tipo L) em frentes de escavação subterrâneas (túnel do Marão) - Túnel Poente Norte, pk 15+719,00

Anexo VII – Exemplo de ficha de levantamento geomecânico do martelo de Schmidt (tipo L) em frentes de escavação subterrâneas (túnel do Marão) - Túnel Poente Sul, pk 15+737,00

Anexo VIII – Exemplo de ficha de levantamento geomecânico do martelo de Schmidt (tipo L) em frentes de escavação subterrâneas (túnel do Marão) - Túnel Poente Sul, pk 15+864,00

Anexo IX – Aspectos gerais da empreitada do túnel do Marão

Índice de Figuras

Figura 1. Técnica de amostragem linear (adaptado de Hudson & Harrison, 2000): esquemas representativos dos traços de descontinuidades que intersectam uma linha de amostragem numa superfície exposta do maciço rochoso. A. Caso de uma linha de amostragem intersectada por uma família de descontinuidades que tendo vários limites de extensão produzem semi-comprimentos de vários tamanhos; B. Caso de uma descontinuidade aleatoriamente intersectada [ba] em que por a linha de amostragem se encontrar próxima do limite inferior de exposição apenas será, normalmente, possível medir o semi-comprimento [ia] cuja extremidade [a] é visível.	5
Figura 2. Exemplificação de uma frente de escavação rochosa com fita graduada na soleira para levantamento com recurso à técnica das “scanlines” (foto: Cláudio Santa; Túnel do Marão, Maio de 2015).	7
Figura 3. Ficha-tipo de levantamento geológico-geomecânico de campo com a aplicação da técnica de amostragem linear (arquivo LABCARGA): exemplo de aplicação ao túnel do marão.	8
Figura 4. Exemplificação do ensaio com esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt, tipo L) numa frente de escavação rochosa (foto: Túnel do Marão, Maio de 2015).	9
Figura 5. Ficha-tipo de levantamento geomecânico de campo, com recurso ao martelo de Schmidt (Arquivo LABCARGA): exemplificação com dados resultantes do ensaio com o esclerómetro portátil numa frente de escavação.	9
Figura 6. Ábaco de Miller para o cálculo da resistência à compressão simples a partir da resistência de Schmidt (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).	10
Figura 7. Exemplo do uso do programa geo- informático Dips (RocScience Inc.).	11
Figura 8. Exemplo de aplicação da base de dados ScanGeoData BGD (Basic Geotechnical Description of Rock Masses) desenvolvida para maciços rochosos fracturados (Fonseca et al., 2010).	12
Figura 9. Ábaco para estimar as constantes m_b/m_i , S , módulo de deformabilidade E_m , coeficiente de Poisson, o GSI para o critério de rotura generalizado Hoek-Brown baseado na estrutura do maciço rochoso e as condições das superfícies de descontinuidades (segundo Hoek et al., 1998).	17
Figura 10. Ábacos de classificação do GSI com código alfabético e para estimativa do intervalo de valor (Hoek & Brown, 1997).	18
Figura 11. Ábaco de classificação do GSI com integração de um novo campo para rochas foliadas (Hoek et al., 1998)	19
Figura 12. Ábaco de classificação do GSI para rochas heterogéneas do tipo “flysch” (Hoek & Marinos, 2001).	20
Figura 13. Adaptação do ábaco de classificação do GSI para quantificação (Hoek et al., 2013)	21
Figura 14. Comparação dos dois métodos de quantificação do GSI (Hoek, 2013)	21
Figura 15. Procedimento de medição e exemplo de cálculo do RQD (adaptado de Pinheiro, 2013).	23
Figura 16. 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 ($TRQD_t$ – <i>theoretical RQD for a general threshold value t</i>), adaptado de Priest (1993).	24
Figura 17. Comparação entre GSI por observação directa e calculado segundo J_c e RQD (Hoek et al., 2013).	25
Figura 18. Ábaco de quantificação do GSI com o uso de J_{c89} e RQD (Hoek et al., 2013).	26

Figura 19. Correlação entre a razão da coesão/ resistência à compressão uniaxial, o GSI e o índice do material (adaptado de Hoek & Marinos, 2000)	30
Figura 20. Correlação entre ao ângulo de atrito, o GSI e o índice do material para profundidades superiores a 30m (adaptado de Hoek & Marinos, 2000)	30
Figura 21. Correlação entre o Módulo de Deformabilidade, a resistência à compressão uniaxial e o GSI (adaptado de Hoek & Marinos, 2000).....	31
Figura 22. Correlação entre a razão da resistência do maciço e a resistência da amostra intacta, o índice do material m_i e o GSI (adaptado de Hoek & Marinos, 2000)	31
Figura 23. Intervalo de valores prováveis de GSI para alguns tipos de rocha (adaptado de Hoek, 2001).....	33
Figura 24. 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 (adaptado de Chaminé et al., 2015).....	39
Figura 25. Traçado do “Túnel do Marão” sendo constituído por 2 túneis paralelos (Túnel Norte: Este-Oeste; e Túnel Sul: Oeste-Este), com um extensão de cada túnel a rondar os 5,667 metros; 12 galerias de emergência e 1 posto técnico.	43
Figura 26. Ciclo de escavação em obras subterrâneas: uma visão integradora.	44
Figura 27. Quadro geológico-geotécnico geral da envolvente ao traçado “Túnel do Marão”: planta e perfil interpretativo (elementos do arquivo do projectista); confrontar com o quadro 8.	45
Figura 28. Esboço geológico representativo da cartografia geológica regional de superfície, mostrando as principais estruturas bem como a posição do túnel e a localização dos trabalhos de prospecção efectuados (adaptado de Coke, 2000).....	48
Figura 29. Filonetes de quartzo nos materiais metassedimentares.	50
Figura 30. Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassilitos, conferindo ao maciço um aspecto listrado	51
Figura 31. Contacto entre os metassedimentos e o xisto cinzento por um filão de quartzo	51
Figura 32. Xisto cinzento com xistosidade segundo E-W;80°S.	52
Figura 33. Quartzito fino em contacto com os metassedimentos	52
Figura 34. Diagrama de isodensidades das descontinuidades observadas no túnel poente Norte.	54
Figura 35. Diagrama de isodensidades das descontinuidades observadas nos xistos cinzentos no túnel poente Norte.....	55
Figura 36. Diagrama de isodensidades das descontinuidades observadas nos metassedimentos no túnel poente Norte.....	55
Figura 37. Diagrama de isodensidades das descontinuidades observadas no quartzito fino no túnel poente Norte.	55
Figura 38. Diagrama de isodensidades das descontinuidades observadas no túnel poente Sul.	56
Figura 39. Diagrama de isodensidades das descontinuidades observadas nos xistos cinzentos no túnel poente Sul.	56
Figura 40. Diagrama de isodensidades das descontinuidades observadas nos metassedimentos no túnel poente Sul.	57
Figura 41. Diagrama de isodensidades das descontinuidades observadas no quartzito fino no túnel poente Sul.	57
Figura 42. Zonamento da heterogeneidade litológica, Zonamento de grau de alteração e zonamento de grau de resistência para o Túnel Norte.....	71

Figura 43. Zonamento Geotécnico com subzonas para o Túnel Norte.....	73
Figura 44. Zonamento baseado na heterogeneidade litológica, Zonamento de grau de alteração e zonamento de grau de resistência para o Túnel Sul.	77
Figura 45. Zonamento Geotécnico com subzonas para o Túnel Sul.	79
Figura 46. Comparação dos valores obtidos para cada uma das classificações Hoek et al. (1998) vs Hoek et al. (2013).	84
Figura 47. Comparação dos valores obtidos para cada uma das classificações Hoek et al. (1998) vs Hoek et al. (2013) para o mesmo RMR (Bieniawski, 1989).	85
Figura 48. Comparação dos valores obtidos para cada uma das classificações Hoek et al. (1998) vs Hoek et al. (2013) para o mesmo RMR (Bieniawski, 1989).	88
Figura 49. Zonamento para as versões de GSI (GSI98: Hoek et al., 1998; GSI2001: Marinos & Hoek, 2001; GSI2013: Hoek et al., 2013) e RMR (Bieniawski, 1989) no túnel Poente Sul.	89
Figura 50. Zonamento para as versões de GSI (GSI98: Hoek et al., 1998; GSI2001: Marinos & Hoek, 2001; GSI2013: Hoek et al., 2013) e RMR (Bieniawski, 1989) no túnel Poente Norte.....	90
Figura 51. Zonamento resultante da sobreposição do GSI (Hoek et al., 2013) e RMR (Bieniawski, 1989) no túnel Poente Sul.....	93
Figura 52. Zonamento resultante da sobreposição do GSI (Hoek et al., 2013) e RMR (Bieniawski, 1989) no túnel Poente Norte.	94
Figura 53. Zonamento Geomecânico do túnel Poente Sul.	97
Figura 54. Zonamento Geomecânico do túnel Poente Norte.....	98

Índice de Quadros

Quadro 1. Principais parâmetros geológicos e geotécnicos das descontinuidades de maciços rochosos (adaptado de: ISRM 1978, 1981, 2007, 2015; Aires-Barros, 1991; GSE, 1995; Priest, 1993; Brady & Brown, 2004; Ferrer & González de Vallejo, 2007; Palmström & Stille, 2010; González de Vallejo & Ferrer, 2011).	6
Quadro 2. Classificação da resistência à compressão simples (ISRM, 1981)	11
Quadro 3. Quadro de classificação das características das descontinuidades J_{Cond89} (adaptado de Bieniawski, 1989).	22
Quadro 4. Descrição e pesos atribuídos às condições das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).	22
Quadro 5. Estimativa de Resistência à Compressão Uniaxial (UCS) de rocha intacta e grau de qualidade da rocha (adaptado de Hoek & Marinos, 2001).	27
Quadro 6. Valores da constante do material m_i para maciços intactos por tipo de rocha (adaptado de Hoek & Marinos, 2000; Hoek, 2007).	28
Quadro 7. Tabela de cálculo das propriedades dos maciços rochosos (Hoek & Marinos, 2000). ...	29
Quadro 8. Parâmetros do projecto considerados para definição de cada zona geotécnica de referência no projecto do Túnel do Marão (elementos do arquivo do projectista).	45
Quadro 9. Planos médios das famílias de descontinuidades observadas no túnel poente Norte (cf. figuras 34 a 37).	54
Quadro 10. Planos médios das famílias de descontinuidades observadas no túnel poente Sul (cf. figuras 38 a 41).	56
Quadro 11. Síntese das características das descontinuidades nos Xistos Cinzentos do Túnel Norte.	58
Quadro 12. Síntese das características das descontinuidades nos Metassedimentos do Túnel Norte	59
Quadro 13. Síntese das características das descontinuidades nos Quartzitos do Túnel Norte.....	60
Quadro 14. Síntese das características das descontinuidades nos Xistos Cinzentos do Túnel Sul..	61
Quadro 15. Síntese das características das descontinuidades nos Metassedimentos do Túnel Sul	62
Quadro 16. Síntese das características das descontinuidades nos Quartzitos do Túnel Sul	63
Quadro 17. Resultado da aplicação das três versões do GSI e aspectos geológicos-geotécnicos observados no túnel Poente Sul.	65
Quadro 18. Resultado da aplicação das três versões do GSI e aspectos geológicos-geotécnicos observados no túnel Poente Sul	66
Quadro 19. Parâmetros para definição de zonamentos (parâmetros geológico-geotécnicos segundo ISRM, 1981) de maciços rochosos fracturados.	67
Quadro 20. Valores dos parâmetros geotécnicos nas zonas geotécnicas do Túnel Norte.	69
Quadro 21. Valores dos parâmetros geotécnicos nas zonas geotécnicas do Túnel Sul.	76
Quadro 22. Comparação das classificações Hoek et al. (1998) vs Hoek et al. (2013) no túnel Ponte Sul.	82
Quadro 23. Comparação das classificações Hoek et al. (1998) vs Hoek et al. (2013) no túnel Ponte Norte.	83
Quadro 24. Comparação das classificações Marinos & Hoek (2001) vs Hoek et al. (2013) no túnel Ponte Sul.	86

Quadro 25. Comparação das classificações Marinos & Hoek (2001) vs Hoek et al. (2013) no túnel Ponte Norte.	87
Quadro 26. Zonas definidas para o túnel Poente Sul.....	91
Quadro 27. Zonas definidas para o túnel Poente Norte.	91

1.

Introdução geral

“The geological strength index (GSI) is a system of rock-mass characterization that has been developed in engineering rock mechanics to meet the need for reliable input data, particularly those related to rock-mass properties required as inputs into numerical analysis or closed form solutions for designing tunnels, slopes or foundations in rocks.” (Marinos et al., 2005)

1. Introdução geral

1.1. Enquadramento

Este trabalho insere-se na Unidade Curricular “Dissertação/Projecto/Estágio” (anual) do 2º ano do curso de **Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente** do Departamento de Engenharia Geotécnica (DEG), **Instituto Superior de Engenharia do Porto** (ISEP) do Politécnico do Porto.

O presente projecto de tese de mestrado foi desenvolvido no âmbito do acompanhamento geológico-geotécnico da escavação do “Túnel do Marão” (Vila Real, Norte de Portugal), sendo o signatário da dissertação o responsável pela equipa de geologia e geotecnia desta empreitada da **Empresa Portuguesa de Obras Subterrâneas, SA** (EPOS), em estreita parceria com o **Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada** (LABCARGA) do ISEP.

A investigação centra-se, essencialmente, no estudo e aplicação, em frentes de escavação de túneis rochosos, da classificação geomecânica designada por “Geological Strength Index” (GSI) baseada no índice de resistência do material-rocha, tendo sido proposta por Hoek (1994) e com desenvolvimentos, entre outras publicações, em Hoek et al. (1995), Hoek & Brown (1997, 1998), Hoek & Marinos (2000), Marinos & Hoek (2000, 2001), Cai et al. (2004), Marinos et al. (2005, 2006, 2007), Hoek (2007), Tsiambaos & Saroglou (2010) e Hoek et al. (2013). Assim, este trabalho engloba uma pesquisa exaustiva da história de um dos índices geotécnicos mais usados na caracterização de maciços rochosos, desde a sua publicação inicial (Hoek, 1994; Hoek et al., 1998) até a sua última versão, o denominado “GSI|2013” (Hoek et al., 2013) passando por todas as actualizações, correcções e derivações que foram sendo publicados a maioria pelo autor principal Professor Eng. Ervert Hoek (pormenores no sítio “Hoek’s Corner” da “RocScience Inc”: <https://www.rocscience.com/learning/hoek-s-corner>) em colaboração com outros geoprofissionais (Hoek, 1999; Bock, 2006). Em suma, para o estudo e a aplicação da mais recente versão desta classificação (GSI|2013; Hoek et al., 2013) e sua comparação com outras versões foram efectuados pormenorizados e sistemáticos levantamentos geológico-geotécnicos na frente de escavação rochosa no emboquilhamento ponte túnel do Marão.

1.2. Objectivos

Este projecto teve como principal objectivo discutir a validade da aplicação da mais recente versão do “GSI – Geological Strength Index” (Hoek et al., 2013) em maciços rochosos heterógenos e a sua aplicabilidade na definição de sustimento, especialmente, em obras subterrâneas. Assim, analisando o historial do GSI desde a sua proposta inicial em meados dos anos 90, do século XX, até à última revisão de fundo, em 2013, sobre a qual incide esta dissertação; pretendeu-se, assim, escrutinar a sua evolução e melhoramentos introduzidos que transformaram uma classificação geotécnica que resultava num índice qualitativo e que hoje se revela quantitativa, preconizadora do suporte e indicadora da qualidade do maciço em termos de uma verdadeira classificação geomecânica de maciços rochosos (pormenores em Hoek et al., 2013). Ainda como objectivo deste estudo recorreu-se à aplicação da técnica de amostragem linear (e.g., ISRM, 1981; Lamas, 1989; CFCFF, 1996; Dinis da Gama, 1995; Bell, 1992; Chaminé & Gaspar, 1995; Peacock et al., 2003; Brady & Brown, 2004; Peacock, 2006; Martins et al., 2006; Chaminé et al., 2001, 2013, 2015; Watkins et al., 2015) para enfatizar a importância da cartografia de zonamento geotécnico em frentes de escavação rochosa de obras subterrâneas.

Sintetizando, os objectivos principais do projecto de mestrado são:

- Caracterização e descrição geológico-geotécnica das frentes de escavação do Túnel do Marão (em particular, a frente Poente do túnel Norte e do túnel Sul) com recurso à técnica da amostragem linear para a avaliação do grau de compartimentação, caracterização geotécnica e geomecânica (ISRM, 1978, 1981, 2007, 2015; GSE, 1995; CFCFF, 1996) e as cartografias de geologia de engenharia e de zonamento geotécnico (IAEG, 1981,a,b; Griffiths, 2002; Zuquette & Gandolfi, 2004);
- Estimar a resistência geomecânica das superfícies de descontinuidade e do material-rocha presente em cada nova superfície estrutural de frente de escavação através da realização de ensaios geomecânicos “in situ” com recurso ao esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt, tipo L; Aydin, 2015);
- Caracterização básica dos parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos através de uma análise estatística básica, dando primazia à aplicação da mais recente versão do “Geological Strength Index” (GSI|2013; Hoek et al., 2013) por comparação com outras versões do GSI;
- Definir um zonamento geotécnico com base nas condições geológico-geotécnicas gerais (ISRM, 1981; CFCFF, 1996);
- Definir um zonamento geomecânico com base na avaliação GSI e contribuir para a delimitação de uma cartografia geomecânica.

1.3. Metodologias e técnicas

Cartografia de frentes de escavação com recurso à técnica “Scanline”

A cartografia de descontinuidades baseia-se na recolha de dados de campo do maciço rochoso e são essenciais para estimar a sua qualidade em termos de geomecânica de meios descontínuos (e.g., Bell, 1992; Dinis da Gama, 1995; Galiza et al., 2011; Marinos, 2012; Chaminé et al., 2013, 2015). A resistência, a deformabilidade e a permeabilidade do maciço rochoso são fortemente influenciadas pelas suas descontinuidades (e.g., Barton & Choubey, 1977; Brown, 1981; Serafim & Pereira, 1983; Hoek & Diederichs, 2006; Rocha, 2013a,b). A técnica da amostragem linear (“scanline sampling technique”) ou simplesmente designada de “scanlines” baseia-se numa técnica expedita com a medição sistemática e descrição das descontinuidades que intersectam uma linha desenhada sobre a superfície a analisar (e.g., Hudson & Priest, 1983; Lamas, 1989; Dinis da Gama, 1995; Bell, 1992; Priest, 1993; Chaminé & Gaspar, 1995; Brady & Brown, 2004; Chaminé et al., 2001, 2013, 2015; Watkins et al., 2015; Mahé et al., 2015), figura 1.

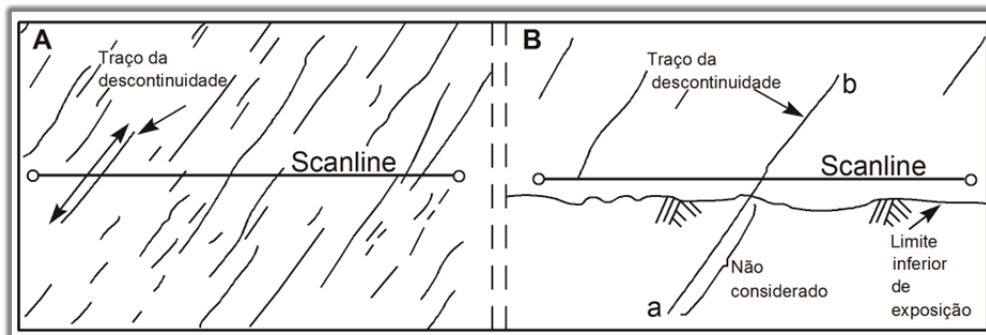


Figura 1. Técnica de amostragem linear (adaptado de Hudson & Harrison, 2000): esquemas representativos dos traços de descontinuidades que intersectam uma linha de amostragem numa superfície exposta do maciço rochoso. A. Caso de uma linha de amostragem intersectada por uma família de descontinuidades que tendo vários limites de extensão produzem semi-comprimentos de vários tamanhos; B. Caso de uma descontinuidade aleatoriamente intersectada [ba] em que por a linha de amostragem se encontrar próxima do limite inferior de exposição apenas será, normalmente, possível medir o semi-comprimento [ia] cuja extremidade [a] é visível.

A geometria de um maciço rochoso é definida pelas suas descontinuidades, a sua densidade, orientação, tamanho, espaçamento (“fracture intercept”; ISRM, 1981); a este conjunto designa-se, geralmente, o grau de fracturação (“fracture degree”) de um dado maciço rochoso. Os levantamentos de campo para caracterização de determinada área envolvem vários parâmetros chave para a caracterização dos maciços rochosos (ISRM, 1981), Quadro 1. Desta forma é essencial a quantificação o mais precisa possível destes parâmetros e a criação de uma base de dados para apoio aos processos de tomada de decisão e avaliação de risco em projectos de geoengenharia (Chaminé et al., 2015).

Quadro 1. Principais parâmetros geológicos e geotécnicos das descontinuidades de maciços rochosos (adaptado de: ISRM 1978, 1981, 2007, 2015; Aires-Barros, 1991; GSE, 1995; Priest, 1993; Brady & Brown, 2004; Ferrer & González de Vallejo, 2007; Palmström & Stille, 2010; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Características	Descrição	Simbologia		Descrição	Designações					
		W1	W1-2							
Atitude geológica	Direção e inclinação de uma descontinuidade. A direção corresponde ao ângulo que a descontinuidade faz com o Norte magnético no plano horizontal, a inclinação corresponde ao ângulo que a recta de maior declive da descontinuidade (perpendicular à direção) faz com o plano horizontal. Ambos os parâmetros são medidos com recurso a uma bússola de geólogo.	W1	W1-2	Não se observam sinais de alteração na matriz rochosa	Compacto com descontinuidades em geral, fechadas					
Grau de alteração das paredes	O grau de alteração de um maciço resulta da exposição do mesmo a agentes químicos e/ou físicos que alteram as características do maciço. O grau de alteração varia entre S10 (W1) e Completamente alterado (W5), sendo a avaliação feita por inspeção visual e pela sensibilidade ao toque. Nota: Por vezes, na bibliografia (por exemplo, GSE 1995) é referenciado o termo W6, i.e., desagregação total do maciço podendo ser considerado como um autêntico solo residual.	W2	W3	Mudanças na cor original da matriz rochosa (descoloração)	Permeabilidade do tipo fissural					
		W3	W4	Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo, mantendo-se a estrutura inicial do maciço	Descontinuidades abertas					
Espessamento e grau de fraturação (fracture intercept)	O grau de fraturação é a distância média entre descontinuidades, independentemente da família de descontinuidades a que pertencem. O espessamento corresponde à distância entre descontinuidades adjacentes pertencentes à mesma família.	W4	W5	Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo; a rocha é muito frável	Permeabilidade do tipo fissural					
		W5	W6	Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo residual	Permeabilidade dominante do tipo intersticial					
Continuidade	Comprimento superficial de uma descontinuidade. A medição é feita com uma fita graduada ao longo do traço da superfície da descontinuidade	Nomenclatura		Nomenclatura						
		F1	F2	F3	F4	F5	Designação			
Rugosidade	A rugosidade corresponde às irregularidades das paredes das descontinuidades, quanto maior a rugosidade, maior a resistência ao corte do maciço uma vez que o atrito entre superfícies é maior	Continuidade		Comprimento, L (m)						
		Pouco contínuas	Mediamente contínuas	Muito contínuas	Extremamente contínuas	<1 1-3 3-10 10-20 >20				
Abertura	A abertura de uma descontinuidade corresponde à medida perpendicular entre as paredes próximas da descontinuidade. Pode também ser designada por largura no caso de descontinuidades apresentarem preenchimento	Classe		Descrição						
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Resistência mecânica das paredes	Corresponde à resistência à compressão uniaxial das paredes das descontinuidades. Este parâmetro influencia diretamente a deformabilidade e resistência ao corte do maciço. A resistência mecânica <i>in situ</i> é medida com recurso ao Estreômetro portátil (Método do Schmidt) do tipo L	Abertura (mm)		Resistência à Compressão Simples (MPa)						
		<0,1	0,1-0,25	0,25-0,50	0,50-2,00	2,00-5	5-10	10-100	100-1000	>1000
Percolação de água	Corresponde ao fluxo de água livre que ocorre as descontinuidades do maciço ou que está incluído no maciço. É quantificada por inspeção visual e pela sensibilidade ao toque	Nomenclatura		Designação						
		S	G	F	Muito Elevada	Elevada	Média	Baixa	Muito Baixa	S1-2
Enchimento	Material que se encontra entre as paredes das descontinuidades podendo ser constituído por materiais ou minerais (ex. quartzo, argila, rocha esmagada, terra vegetal, etc.)	Nomenclatura		Designação						
		S	G	F	Húmido (por vezes sub-dividido em ligeiramente húmido e húmido)	Seco	Humido	Seco	S1-2	S1-2

A identificação é feita por inspeção visual e deve ser aferida a espessura do enchimento. A classificação é feita segundo a tipologia do material que compõem o enchimento.

A caracterização do maciço relativamente à sua compartimentação envolve diferentes características que derivarão aspectos descritivos e quantitativos (ISRM, 1981): i) Atitude geológica; ii) Grau de alteração (W); iii) Espaçamento/"*fracture intercept*" (F); iv) Continuidade/Comprimento (L); v) Rugosidade (R); vi) Resistência mecânica das superfícies das descontinuidades (S); vii) Abertura; viii) Enchimento; ix) Terminação (T); x) Percolação de água.

O levantamento dos parâmetros geológico-geotécnicos deve ser sistemático e organizado de forma a recolher a informação com a maior precisão possível. A técnica de amostragem linear consiste na colocação de uma fita graduada em superfícies expostas do maciço rochoso e no registo sistemático dos parâmetros geológico-geotécnicos das descontinuidades que intersectam a fita ao longo do seu comprimento (e.g., Hudson & Priest, 1983; Priest, 1993; Dinis da Gama, 1995; Chaminé & Gaspar, 1995; Chaminé et al., 2013, 2015).

No presente projecto esta técnica foi aplicada colocando uma fita graduada na soleira da frente de escavação (Figura 2) e realizando-se a cartografia das descontinuidades que intersectam a fita; uma vez que este projecto foi integrado na actividade diária laboral nesta frente de obra onde não é geralmente aplicada a técnica de amostragem linear, foram (ainda que pontualmente) cartografadas algumas descontinuidades que não intersectavam a fita graduada mas que se considerou ter interesse do ponto de vista geológico estrutural e geomecânico.



Figura 2. Exemplificação de uma frente de escavação rochosa com fita graduada na soleira para levantamento com recurso à técnica das "scanlines" (foto: Cláudio Santa; Túnel do Marão, Maio de 2015).

Os dados de cada levantamento foram anotados numa ficha de campo geológico-geomecânica (Figura 3) e depois transcritos para uma folha de cálculo Ms. Excel que permitiu apoiar toda a análise e estatísticos básicos.

**FICHA DE LEVANTAMENTO GEOLÓGICO-GEOMECÂNICO
TÉCNICA DA AMOSTRAGEM LINEAR (Scanline)**

Orientação		Data: 04-05-2015		Localização: Poente Norte		pk: 15+728,00												
Perfil: N13°W																		
Scanline: N13°W																		
Altura da "scanline" ao solo (m): 0																		
Parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos segundo ISRM (1978, 1981, 2007), GSE (1995)																		
Descontinuidade nº	Distância à origem (m)	Litologia	Grau de alteração		Tipo de descontinuidade (F-falha; D-diaclase)	Abertura (mm)		Grau de fracturação (cm) (Fracture intercept)		Classificação F	Semi-compartimento (L) (m)		Terminação T	Curvatura C	Rugosidade R	Tipo de enchimento	Presença de água	Observações
			Tipo	Classificação		Valor	Classificação	Valor	Acima da Scanline		Abaixo da Scanline							
1	2.80	Xisto Cinzento	W1	Sã ou não alterada	D	0.1	Fechada	5.00	F5	0.00	0.00	O	C,1	O,3	SP	S		
2	3.00	Xisto Cinzento	W1	Sã ou não alterada	D	1	Aberta	60.00	F3	8.45	0.00	O	C,1	O,3	SP	S		
3	3.05	Xisto Cinzento	W1	Sã ou não alterada	D	1	Aberta	120.00	F2	11.10	0.00	O	C,2	O,3	Qtz	H		
4	4.65	Xisto Cinzento	W1	Sã ou não alterada	D	0.1	Fechada	10.00	F4	9.35	0.00	O	C,1	O,3	SP	S		
5	4.90	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	0.1	Fechada	70.00	F2	9.65	0.00	O	C,1	O,2	SP	S		
6	6.00	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	1	Aberta	100.00	F2	8.25	0.00	O	C,2	O,2	Qtz	H		
7	6.65	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	0.5	Fechada	60.00	F3	9.80	0.00	O	C,1	O,2	SP	H		
8	6.95	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	1	Aberta	90.00	F2	9.75	0.00	O	C,1	O,2	SP	H		
9	8.85	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	0.1	Fechada	55.00	F3	9.60	0.00	O	C,1	O,2	SP	S		
10	9.05	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	0.1	Fechada	80.00	F2	8.75	0.00	O	C,1	O,2	Qtz	S		
11	9.50	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	0.1	Fechada	50.00	F3	7.65	0.00	O	C,1	O,2	SP	H		
12	10.30	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	0.1	Fechada	45.00	F3	6.80	0.00	O	C,1	O,2	SP	H		
13	Has teal	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	0.1	Fechada	100.00	F2	6.90	0.00	O	C,1	O,2	SP	S		
14	Has teal	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	1	Aberta	60.00	F3	7.85	0.00	O	C,1	O,2	SP	S		
15	Has teal	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	1	Aberta	85.00	F2	6.30	0.00	O	C,1	O,2	SP	S		
16	Has teal	Xisto Cinzento	W2	Ligeiramente alterada	D	1	Aberta	25.00	F3	6.90	0.00	O	C,1	O,3	SP	H	Ligeira oxidação das paredes	
17	Has teal	Xisto Cinzento	W1	Sã ou não alterada	D	0.1	Fechada	25.00	F3	6.90	0.00	O	C,1	O,3	SP	H		
18	Has teal	Quartzito	W2	Ligeiramente alterada	D	1	Aberta	200.00	F2	5.50	0.00	D	C,1	O,2	Qtz	S		
* Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltos																		

Figura 3. Ficha-tipo de levantamento geológico-geomecânico de campo com a aplicação da técnica de amostragem linear (arquivo LABCARGA): exemplo de aplicação ao túnel do marão.

Ensaios In Situ com Esclerómetro Portátil

Em cada frente de escavação rochosa cartografada foram realizados ensaios geomecânicos “*in situ*” com recurso ao esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt, tipo L; Figura 4) cujos dados foram também introduzidos numa folha de cálculo (Figura 5).



Figura 4. Exemplificação do ensaio com esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt, tipo L) numa frente de escavação rochosa (foto: Túnel do Marão, Maio de 2015).

FICHA DE LEVANTAMENTO GEOMECÂNICO																		
Esclerómetro Portátil (Martelo de Schmidt, Proceq tipo L)																		
Localização: Poente Norte												Data: 04-05-2015						
pk: 15+728,00																		
Estação Geomecânica nº	Distância à origem (m)	Descontinuidade			Grau de Alteração (ISRM, 1978, 1981; GSE, 1995)	Valor do ressalto ("dureza de Schmidt", R)										Valor médio do ressalto (ISRM, 1978, 1981; 1987, 2007; ASTM, 2001)	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	Classe de Resistência (ISRM, 1981)
		nº	Atitude	Tipo		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
	3.00	2	N4°E;90°	D	W1	41.20	40.60	39.80	42.40	40.60	38.70	40.10	41.80	40.60	37.80	41.32	67.8	S2
	9.05	10	N16°E;80°NW	D	W1	42.60	43.40	40.20	41.60	44.70	42.80	43.50	42.80	42.60	43.70	43.62	76.0	S2

Figura 5. Ficha-tipo de levantamento geomecânico de campo, com recurso ao martelo de Schmidt (Arquivo LABCARGA): exemplificação com dados resultantes do ensaio com o esclerómetro portátil numa frente de escavação.

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; Katza et al., 2000; Kahraman, 2001; Aydin & Basu, 2005; Aydin, 2015).

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.

A ISRM (1981, 2015) 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. Este valor é depois transposto para o ábaco de Miller (Figura 6) onde é determinada a resistência à compressão uniaxial.

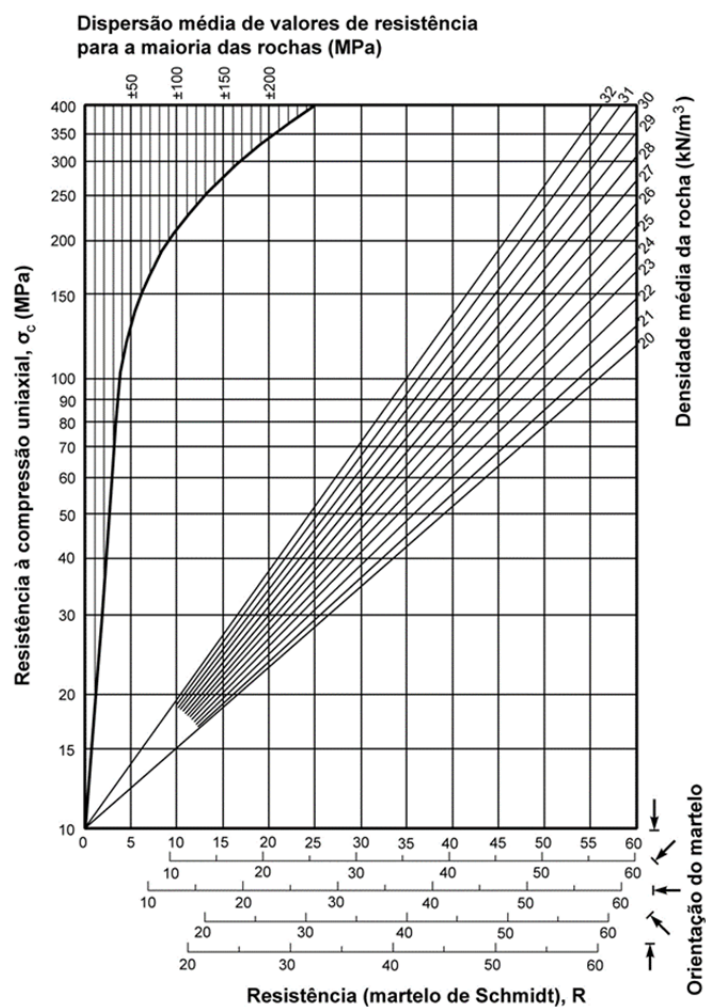


Figura 6. Ábaco de Miller para o cálculo da resistência à compressão simples a partir da resistência de Schmidt (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

As classes de resistência de compressão, segundo a ISRM (1981), são sistematizada em 5 termos de resistência (Quadro 2).

Quadro 2. Classificação da resistência à compressão simples (ISRM, 1981)

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

Ferramentas geo-informáticas

O tratamento estatístico das descontinuidades, que conduziu à definição das principais famílias de descontinuidades e análise geoestrutural, foi feito com recurso à elaboração de diagramas de contorno estrutural e de rosetas, utilizando o programa geo-informático Dips da Rocscience (Figura 7), cuja licença está salvaguardada pelo LABCARGA|ISEP.

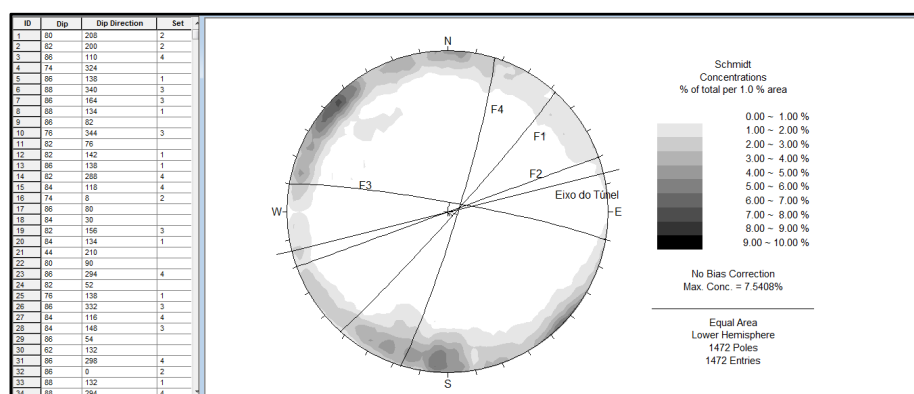


Figura 7. Exemplo do uso do programa geo- informático Dips (RocScience Inc.).

Os dados recolhidos nos levantamentos de frente de escavação foram compilados em bases de dados dinâmicas em MS. Excel desenvolvidas no LABCARGA|ISEP, especialmente, a calculadora geotécnica “GeoTech|CalcTools: ScanGeoData|BGD & SchmidtData|UCS” (Fonseca, 2008; Ramos, 2008; Fonseca et al., 2010) e a calculadora geomecânica “MGC-RocDesign|Calc (Pinheiro, 2013; Pinheiro et al., 2014). Estas permitiram efectuar um cruzamento exaustivo de toda a informação e consequente análise e interpretação dos dados geológicos, geotécnicos e geomecânicos para a elaboração da proposta de um zonamento geotécnico-geomecânico (Figura 8). Foram ainda incorporadas todas as técnicas básicas de análise geológico estrutural de maciços rochosos (e.g., Sodré Borges, 2002; Ragan, 2009; Watkins et al., 2015).

2.

“Geological Strength Index” (GSI): breve síntese crítica

“The original Geological Strength Index (GSI) chart was developed on the assumption that observations of the rock mass would be made by qualified and experienced geologists or engineering geologists. When such individuals are available, the use of the GSI charts based on the descriptive categories of rock mass structure and discontinuity surface conditions have been found to work well. However, there are many situations where engineering staff rather than geological staff are assigned to collect data, which means that the mapping of rock masses or core is carried out by persons who are less comfortable with these qualitative descriptions.” (Hoek et al., 2013)

2. “Geological Strength Index”: breve síntese crítica

2.1. Considerações iniciais

O “Geological Strength Index” (GSI) foi apresentado, tal como referido, por Hoek (1994) — com desenvolvimentos, entre outros trabalhos, em Hoek et al. (1998), Hoek & Brown (1997, 1998), Hoek & Brown (1998), Hoek & Marinos (2000), Marinos & Hoek (2000, 2001) — em que permite de forma expedita estimar a resistência do maciço rochoso com base nas observações geológicas e geotécnicas de campo. Para o efeito, foram desenvolvidos ábacos para maciços rochosos fracturados e maciços de rochas metassedimentares.

A avaliação de maciços rochosos pelo GSI é baseada na análise da sua geoestrutura no que respeita à compartimentação estrutural e às condições geológico-geotécnicas das suas discontinuidades, nomeadamente, o grau de alteração e a rugosidade. A combinação dos dois parâmetros (i.e., o grau de compartimentação em termos de geoestrutura e as condições das discontinuidades) fornece uma base para a classificação geotécnica de uma vasta gama de maciços rochosos com diferentes graus de alteração e de compartimentação estrutural (Hoek et al., 1998).

Hoek & Brown (1980b) introduziram o critério de rotura com o objectivo de fornecer dados para os parâmetros requeridos nas análises numéricas de dimensionamento de estruturas subterrâneas em rochas duras. Com a aceitação do critério de rotura, dada a inexistência de alternativas adequadas, este foi sendo adaptado a diversas aplicações (Hoek, 1998). Foi entretanto examinar as relações de redução de resistência empregues e introduzir novos elementos, como a ideia de maciço perturbado e não perturbado, e ainda, um critério modificado que forçasse a resistência à tracção do maciço a tender para zero em maciços de rochas brandas. Com a introdução dessas alterações nas equações do critério de Hoek & Brown (1980b) concluiu-se que o RMR (“Rock Mass Rating”; Bieniawski, 1989) já não seria o mais adequado para a relação entre o critério de rotura e as observações geológicas no terreno, principalmente quando perante

um maciço de muito fracas características (pormenores em Hoek et al., 2002; Hoek & Marinos, 2007). Isto resultou na generalização ao nível da sua aplicação do “Geological Strength Index” (Hoek et al., 1998) que posteriormente foi estendido a maciços de rochas brandas e heterogéneas (Hoek & Marinos, 2000; Marinos & Hoek, 2001; Marinos et al., 2005, 2006, 2007). Assim, o GSI foi desenvolvido para complementar a aplicação do critério de rotura de Hoek & Brown (1980a,b) em materiais rochosos competentes ou brandos.

2.2. Principais versões do GSI: evolução histórica

Hoek et al. (1995)

A primeira publicação de fundo sobre o “Geological Strength Index” (GSI) foi apresentada por Evert Hoek, Peter K. Kaiser e William F. Bawden no livro intitulado “*Support of underground excavations in hard rock*” onde analisando o critério de rotura de Hoek & Brown (1980b) — consultar figura 9 — conclui-se que o uso do RMR de Bieniawski (1989) não se adequava como elo de ligação entre o critério de rotura e a observação geológica no campo, sobretudo em maciços de características geomecânicas fracas, ou seja esta relação só seria aceitável para maciços com RMR superior a 25. Assim, foi apresentado o “Geological Strength Index”, um índice que teria variação entre 10 para maciços de fracas características geomecânicas e 100 para maciços intactos; sendo ainda apresentadas as relações entre o GSI e as constantes de Hoek-Brown:

- Para $GSI > 25$

$$\frac{mb}{mi} = \exp\left(\frac{GSI-100}{28}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right)$$

$$a = 0.5$$

- Para $GSI < 25$

$$s = 0$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200}$$

No ábaco apresentado na figura 9, além dos valores de GSI, é possível determinar tensões de rotura, constantes do material e módulos de deformabilidade.





GENERALISED HOEK-BROWN CRITERION		SURFACE CONDITION					
$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a$ <p> σ_1' = major principal effective stress at failure σ_3' = minor principal effective stress at failure σ_c = uniaxial compressive strength of <i>intact</i> pieces of rock m_b, s and a are constants which depend on the composition, structure and surface conditions of the rock mass </p>		VERY GOOD Very rough, unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Smooth, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings containing angular rock fragments	VERY POOR Slackened, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings	
STRUCTURE							
	BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	m_b/m_i s a E_m ν GSI	0.60 0.190 0.5 75,000 0.2 85	0.40 0.062 0.5 40,000 0.2 75	0.26 0.015 0.5 20,000 0.25 62	0.16 0.003 0.5 9,000 0.25 48	0.08 0.0004 0.5 3,000 0.25 34
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	m_b/m_i s a E_m ν GSI	0.40 0.062 0.5 40,000 0.2 75	0.29 0.021 0.5 24,000 0.25 65	0.16 0.003 0.5 9,000 0.25 48	0.11 0.001 0.5 5,000 0.25 38	0.07 0 0.53 2,500 0.3 25
	BLOCKY/SEAMY - folded and faulted with many intersecting discontinuities forming angular blocks	m_b/m_i s a E_m ν GSI	0.24 0.012 0.5 18,000 0.25 60	0.17 0.004 0.5 10,000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6,000 0.25 40	0.08 0 0.5 3,000 0.3 30	0.06 0 0.55 2,000 0.3 20
	CRUSHED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded blocks	m_b/m_i s a E_m ν GSI	0.17 0.004 0.5 10,000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6,000 0.25 40	0.08 0 0.5 3,000 0.3 30	0.06 0 0.55 2,000 0.3 20	0.04 0 0.60 1,000 0.3 10

Figura 9. Ábaco para estimar as constantes m_b/m_i , S , módulo de deformabilidade E_m , coeficiente de Poisson, o GSI para o critério de rotura generalizado Hoek-Brown baseado na estrutura do maciço rochoso e as condições das superfícies de discontinuidades (segundo Hoek et al., 1998).

Hoek & Brown (1997)

Em Hoek & Brown (1997) apresenta-se dois ábacos de classificação (Figura 10), ou seja, o primeiro é um quadro de campo do qual resulta um código alfabético que pode ser transposto para um segundo ábaco onde é possível estimar o valor de GSI. Neste segundo ábaco é feita a referência expressa ao facto deste índice não ser um valor absoluto. Nas próprias palavras dos autores: *“Do not attempt to be too precise. Quoting a range of GSI from 36 to 42 is more realistic than standing that GSI = 38”* (Hoek & Brown, 1997). Neste artigo é também apresentada a correlação entre o GSI de o RMR de Bieniawski (assunto a ser abordado mais à frente).

Em resumo, neste estudo o GSI é apresentado pela primeira vez como um índice de classificação (embora não fornecendo um valor exacto e absoluto; mas sim por um intervalo) e é feita a interacção entre os dados recolhidos nos ábacos de campo e classificativo.

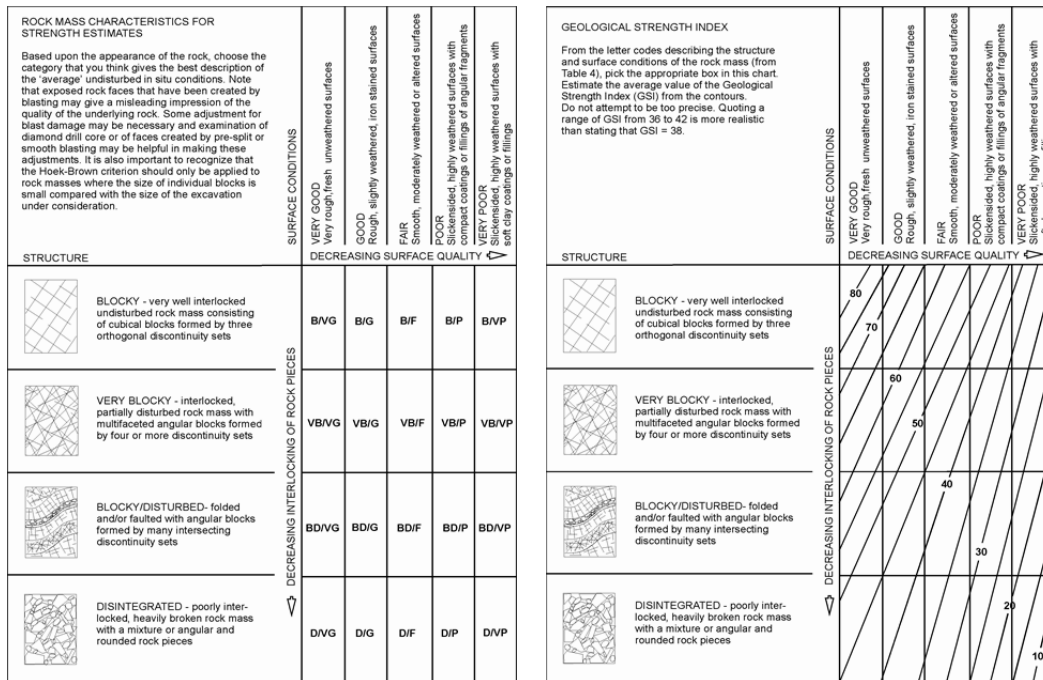


Figura 10. Ábacos de classificação do GSI com código alfabético e para estimativa do intervalo de valor (Hoek & Brown, 1997).

Hoek et al. (1998)

Em 1998, baseando-se no trabalho da co-autora Maria Benissi na escavação do Metro de Atenas (integrando ainda alguns dados de trabalhos de escavação de alguns túneis na Venezuela), os autores estenderam a abrangência do GSI a rochas metassedimentares foliadas e, por isso, rochas brandas de baixa qualidade como é o caso da Formação do Xisto de Atenas.

Tendo-se constatado que as formações rochosas encontradas no substrato rochoso de Atenas não apresentavam características que as permitissem enquadrar no esquema de classificação do GSI dado que as características das superfícies das discontinuidades e a estrutura do maciço não tinham correspondência no ábaco anteriormente proposto. As formações rochosas do projecto não eram estruturalmente propensas à formação de blocos, sendo predominantemente foliadas ou laminadas, não havendo assim na versão original da classificação um campo onde enquadrar estas formações uma vez que nestas devem ser considerados os deslizamentos de massa pelos planos de foliação e não desprendimentos de blocos.

É então apresentado um novo ábaco de classificação (Figura 11) onde é introduzida uma nova categoria na base do quadro para rochas xistentas “foliadas/laminadas/cisalhadas” (*Foliated/laminated/sheared...*) e onde o limite inferior da classificação desde 5 pontos sendo que este tipo de rochas se deve enquadrar entre os valores 5 e 30.

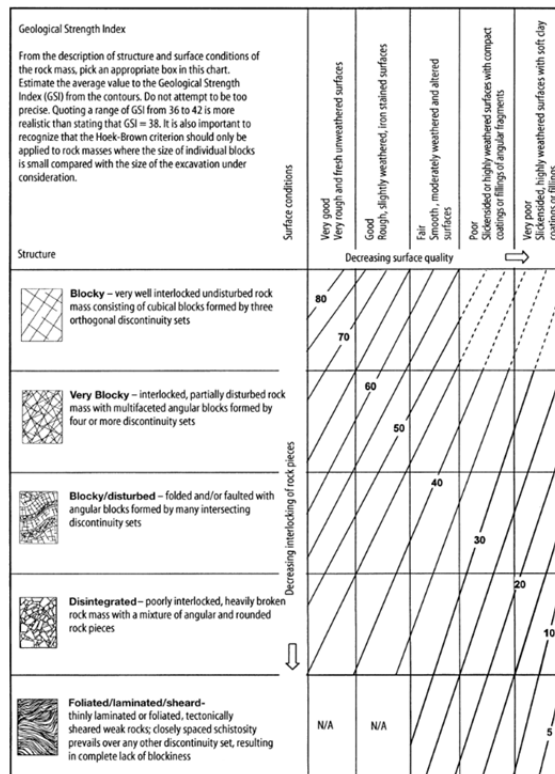


Figura 11. Ábaco de classificação do GSI com integração de um novo campo para rochas foliadas (Hoek et al., 1998)

Marinos & Hoek (2001)

Hoek & Marinos (2001) apresentam uma metodologia para estimar o GSI e as propriedades de maciços heterogêneos, usando como base de estudo um flysch. A gênese destes maciços e a sua herança tectónica conferem a estes maciços uma estrutura complexa que dificulta a sua classificação com os sistemas até aqui apresentados.

Do ponto de vista geotécnico um *flysch* apresenta as seguintes características:

- Heterogeneidade: alternância entre materiais de resistências baixas e altas;
- Presença abundante de minerais de argila;
- Zonas fortemente tectonizadas resultando em materiais com características de solo;
- Baixa permeabilidade e possibilidade de perda de resistência dada a presença de minerais de argila que impedem a drenagem do maciço.

Determinar o GSI para maciços rochosos deste tipo compostos por alternâncias de rochas com resistência baixas e altas apresenta condicionantes especiais. Contudo, dado o elevado número de projectos de engenharia que se desenvolvem neste tipo de maciços tornou-se necessário desenvolver ferramentas de classificação alternativas às já existentes. Assim, para incorporar este tipo de materiais na classificação de GSI foi desenvolvido o ábaco de classificação que se apresenta na Figura 12.

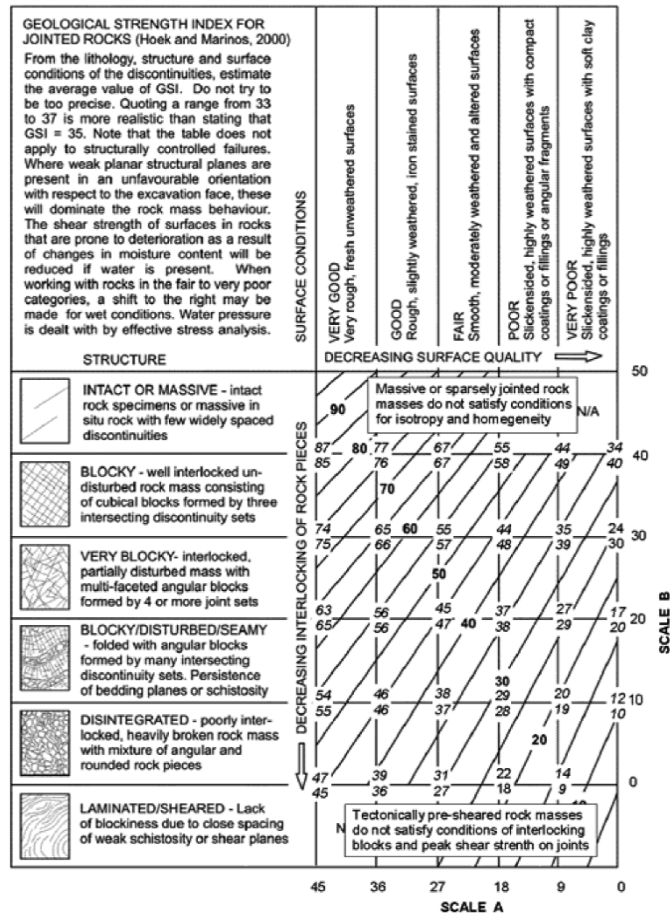


Figura 13. Adaptação do ábaco de classificação do GSI para quantificação (Hoek et al., 2013)

Em cada ponto de intersecção das duas escalas são apresentados dois valores, o valor abaixo da linha corresponde à soma do valor de cada escala, o valor acima da linha corresponde ao valor estimado na versão de base do ábaco. Estes dois valores foram representados graficamente de forma a comparar a proximidade dos resultados obtidos por cada um dos métodos.

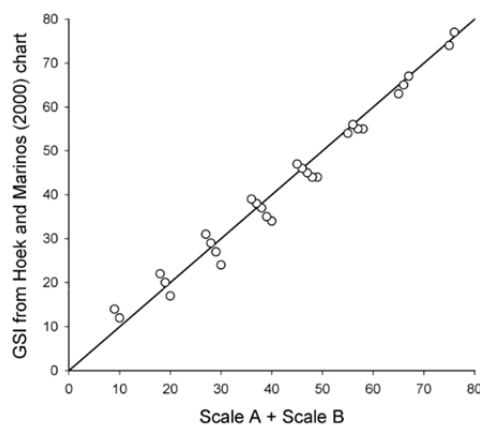


Figura 14. Comparação dos dois métodos de quantificação do GSI (Hoek, 2013)

Analisando o gráfico os autores consideram que a quantificação do GSI com base em duas escalas numéricas é viável, usando os valores correspondentes ao estado das superfícies das descontinuidades (escala horizontal) e à interação dos blocos rochosos definidos pela conjugação das suas descontinuidades (escala vertical). Note-se que os autores referem ainda que a versão original do ábaco apresenta pequenas imprecisões uma vez que foi desenhado à mão, sendo que as linhas que compõem o quadro não são perfeitamente paralelas e igualmente espaçadas, com um ajuste destas condições, a proximidade de valores do gráfico acima apresentado poderá ser ainda mais satisfatória.

Depois de definidos os intervalos de valores para cada escala foram definidos os parâmetros de atribuição de valores correspondentes. Para a escala horizontal os autores definiram o *Joint Condition* (J_{Cond89}) definido por Bieniawski (1989), quadro 3. As características das descontinuidades são as também definidas também por Bieniawski (1989), quadro 4.

Quadro 3. Quadro de classificação das características das descontinuidades J_{Cond89} (adaptado de Bieniawski, 1989).

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

Quadro 4. Descrição e pesos atribuídos às condições das descontinuidades para a classificação RMR (adaptado de Bieniawski, 1989).

Comprimento da descontinuidade (persistência)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20m
	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	fechada	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5mm
	6	5	4	1	0
Rugosidade	muito rugosa	rugosa	ligeira/ rugosa	lisa	espelhada
	6	5	3	1	0
Enchimento	nenhum	< 5mm, duro	> 5mm; duro	< 5mm; mole	> 5mm; mole
	6	4	2	2	0
Alteração	não alterada	ligeira	moderada	muito alterada	decomposta
	6	5	3	1	0

Para a escala vertical, respeitante à compartimentação do maciço foi definido o valor do *Rock Quality Designation* (RQD) definido por Deere (1963) e Deere et al. (1967), figura 15.

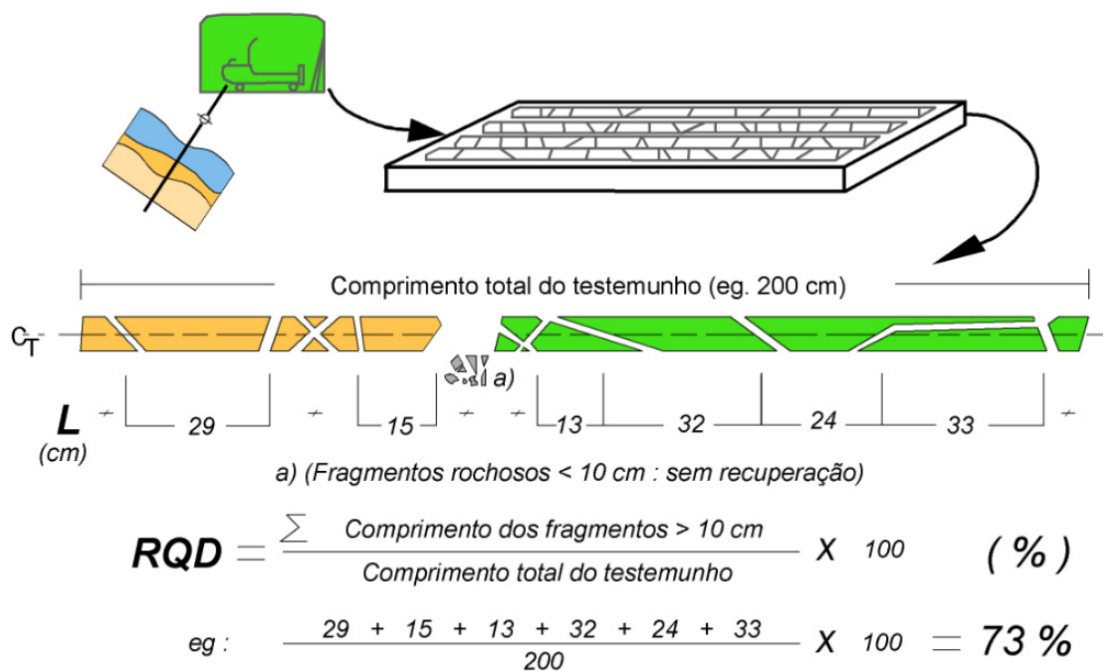


Figura 15. Procedimento de medição e exemplo de cálculo do RQD (adaptado de Pinheiro, 2013).

A Figura 16 apresenta um gráfico, comumente, usado para a determinação do RQDt em função do espaçamento médio das descontinuidades, sendo também conhecido pelo ábaco de Priest (1993).

O valor de RQDt pode ser determinado com base na fórmula proposta por Priest (1993):

$$RQDt = 100e^{-\lambda t}(\lambda t + 1)$$

Sendo:

- t = Valor mínimo do espaçamento entre descontinuidades considerado para o cálculo (para o RQD convencional será 0,1m)
- $\lambda = 1/\text{espaçamento médio das descontinuidades (m)}$

Esta expressão permite através do espaçamento médio das descontinuidades num determinado levantamento estimar o valor de RQDt através do valor mínimo do espaçamento entre descontinuidades (“fracture intercept”, ISRM, 1981) considerado para o cálculo.

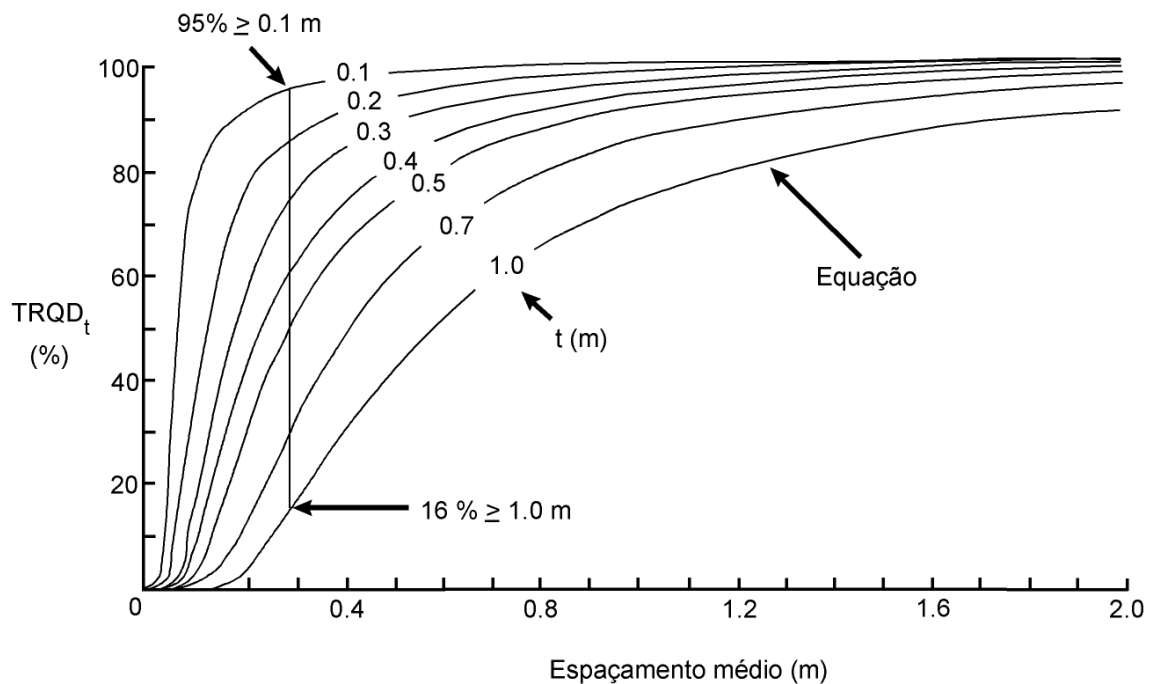


Figura 16. Ábaco para a determinação da variação do RQD com o espaçamento médio das descontinuidades, através do RQD teórico (RQD_t) para uma série de intervalos do valor limiar t (RQD_t – theoretical RQD for a general threshold value t), adaptado de Priest (1993).

Em geral para a determinação do valor de RQD_t considera-se o valor de $t=1$ por forma a se obter uma classificação o mais conservadora possível. Apenas se ajustam a outras curvas do ábaco se os dados do espaçamento forem estatisticamente representativos e o intervalo de confiança cumpre $95\% > 0,1m$ (Priest, 1993).

Assim, o valor do GSI é dado pela expressão (Hoek et al., 2013):

$$GSI = 1.5 J_{Cond_{89}} + RQD/2$$

A Figura 17 mostra a comparação entre o GSI estimado no campo por observação directa e o GSI calculado segundo os parâmetros J_c e RQD. O gráfico mostra que a aplicação da fórmula apresentada é viável apresentando um nível de confiança elevado.

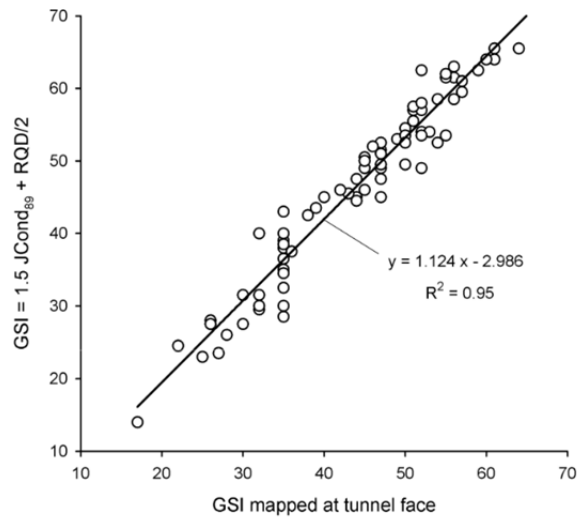


Figura 17. Comparação entre GSI por observação directa e calculado segundo J_c e RQD (Hoek et al., 2013).

Em alternativa ao parâmetro J_{Cond89} como definidor do estado das superfícies das descontinuidades, cujas variáveis nem sempre podem ser quantificadas nas observações de campo, os autores apresentaram duas alternativas igualmente viáveis:

- O uso das características das descontinuidades, J_{Cond76} de Bieniawski (1976) de onde resulta a expressão: $GSI = 2 J_{Cond76} + RQD/2$
- O uso dos parâmetros definidos no “Tunnelling Quality Index” (Q-system) de Barton et al. (1974, 1980) e NGI (2013), J_r (Rugosidade) e J_a (estado de alteração das descontinuidades) de onde resulta a expressão:

$$GSI = \frac{52 \frac{J_r}{J_a}}{\left(1 + \frac{J_r}{J_a}\right)} + RQD/2$$

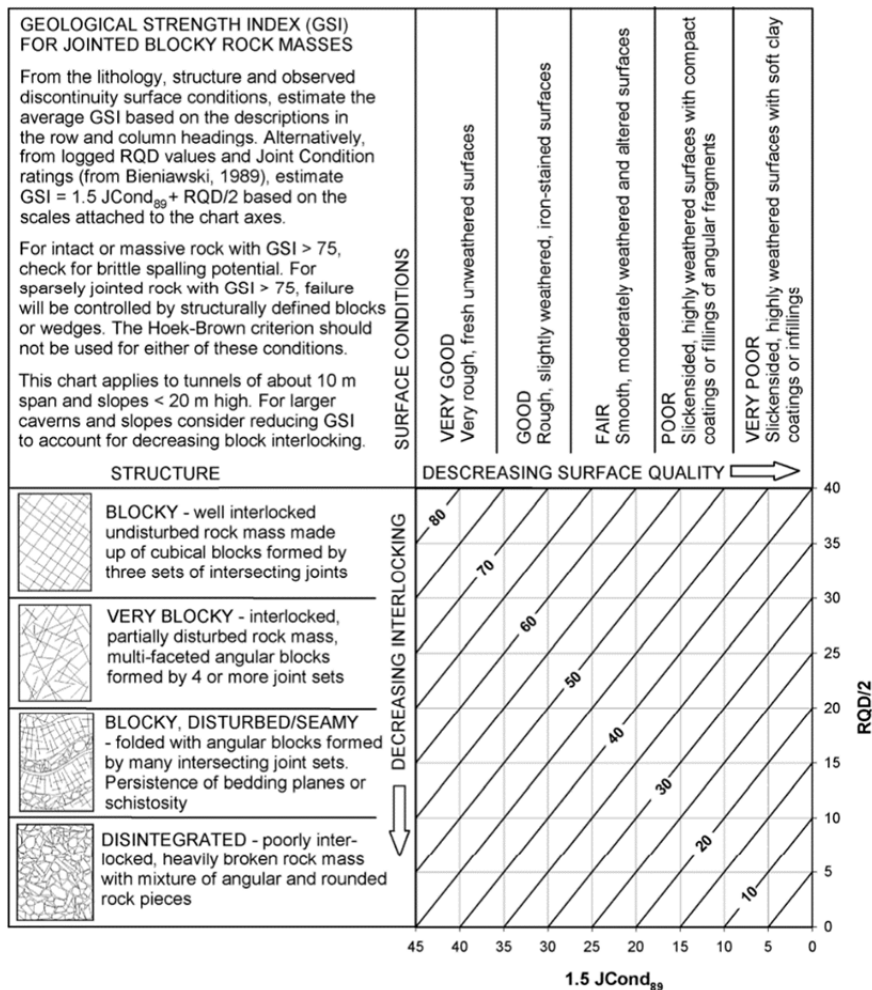


Figura 18. Ábaco de quantificação do GSI com o uso de Jc_{99} e RQD (Hoek et al., 2013).

Deste artigo resulta então um novo ábaco de classificação onde os eixos são apresentados por parâmetros bem definidos e quantificados o que permite retirar da classificação um valor exacto, contrastando com a recomendação das anteriores versões da classificação que apontavam um intervalo de valores como o resultado mais correcto (Figura 18).

2.3. Estimativa das propriedades mecânicas com base no GSI

A estimativa das propriedades mecânicas dos maciços rochosos deve idealmente ser feita com recurso a ensaios laboratoriais, como descrito por Hoek & Brown (1997); contudo em muitas situações há necessidade de usar estes dados antes dos ensaios laboratoriais estarem concluídos, veja-se o caso das obras subterrâneas onde não é viável aguardar pela realização de ensaios laboratoriais para classificar os maciços. Assim o uso do GSI como meio de estimar algumas das propriedades mecânicas das rochas torna-se uma ferramenta muito útil na tomada de decisão na frente de escavação (Hoek & Marinos, 2001).

Ao longo das diversas publicações sobre o “*Geological Strength Index*”, Hoek e co-autores apresentaram ábacos para estimar duas das mais importantes propriedades mecânicas dos maciços, a Resistência à Compressão Uniaxial (σ_{ci}) e a constante do material (m_i) para em conjunto com o valor do GSI determinar as restantes propriedades mecânicas dos maciços rochosos. Estas tabelas foram sofrendo ligeiros ajustes ao longo dos anos à medida que foram sendo compilados dados laboratoriais e resultado de debates com os vários geo-profissionais (Hoek & Marinos 2001).

Quadro 5. Estimativa de Resistência à Compressão Uniaxial (UCS) de rocha intacta e grau de qualidade da rocha (adaptado de Hoek & Marinos, 2001).

Grau (R – Rocha)	Descrição	Características	Resistência à compressão uniaxial aproximada (MPa)
R0	Rocha muito branda	Marcada pela unha do polegar	0,25 – 1,0
R1	Rocha branda (I)	Fragmentada com pancadas firmes percutidas com a ponta do martelo de geólogo. Pode ser cortada com um canivete	1,0 – 5,0
R2	Rocha branda (II)	Pode ser cortada, com dificuldade, por um canivete. Cortes superficiais obtidos com pancadas firmes percutidas com a ponta do martelo de geólogo	5,0 – 25
R3	Rocha razoavelmente resistente	Não pode ser raspada ou cortada com canivete. Podem-se obter fragmentos de rocha com uma pancada seca do martelo de geólogo	25 – 50
R4	Rocha resistente	Podem-se obter fragmentos dando mais de uma pancada seca com o martelo de geólogo	50 – 100
R5	Rocha muito resistente	Para se obterem fragmentos são necessárias várias pancadas com o martelo de geólogo	100 – 250
R6	Rocha extremamente resistente	Apenas se obtêm lascas percutindo com o martelo de geólogo	>250

Quadro 6. Valores da constante do material m_i para maciços intactos por tipo de rocha (adaptado de Hoek & Marinos, 2000; Hoek, 2007)

Tipo de Rocha	Classe	Grupo	Textura			
			Grosseira	Média	Fina	Muito Fina
Sedimentar	Clásticas	Conglomerados*		Arenitos (17 ± 4)	Siltos (7 ± 2)	Argilitos (4 ± 2)
		Brechas*			Grauvaques (18 ± 3)	Shales (6 ± 2) Margas (7 ± 2)
	Não Clásticas	Carbonatadas	Calcário Cristalino (12 ± 3)	Calcário Esparítico (10 ± 2)	Calcário Micritico (9 ± 2)	Dolomitos (9 ± 3)
		Evaporitos		Gesso (8 ± 2)	Anidritos (12 ± 2)	
Orgânicas					Talco (7 ± 2)	
Metamórficas	Não Foliadas	Margas (9 ± 3)	Horneblendas (19 ± 4)	Quartzitos (20 ± 3)		
			Metarenitos (19 ± 3)			
	Ligeiramente Foliadas	Migmatitos (29 ± 3)	Anfíbolos (26 ± 6)	Gnaisse (28 ± 5)		
	Foliadas**		Xistos (12 ± 3)	Filitos (7 ± 3)	Ardósia (7 ± 4)	
Ígneas	Plutónicas	Claras	Granito (32 ± 3)	Diorito (25 ± 5)		
			Granodiorito (29 ± 3)			
		Escuras	Gabro (27 ± 3)	Dolerito (16 ± 5)		
	Noritos (20 ± 5)					
	Hipabissais		Pórfiros (20 ± 5)		Diabasitos (15 ± 5)	Peridotitos (25 ± 5)
	Vulcânicas	Lávicas		Riólitos (25 ± 5)	Dacitos (25 ± 3)	
			Andesitos (25 ± 5)	Basalto (25 ± 5)		
Piroclásticas		Aglomerados (19)	Brechas (19 ± 5)	Tufos (13 ± 5)		

* Conglomerados e brechas apresentam grande variação quanto ao índice de material, este valor depende do tipo de cimento e do estado de alteração do mesmo, os valores variam entre os apresentados para arenitos e os apresentados para sedimentos finos

** Valores para amostras intactas, o valor do índice do material pode ser significativamente diferente se a rotura se der por um plano de fraqueza.

Com os valores de Resistência à Compressão Uniaxial (σ_{ci}), a constante do material (m_i) e o valor de GSI pode ser usada a seguinte tabela para determinação das propriedades mecânicas de uma maciço rochoso (quadro 7).

Quadro 7. Tabela de cálculo das propriedades dos maciços rochosos (Hoek & Marinos, 2000).

Input:	sigci =	10	MPa	mi =	10		GSI =	30	
	Depth of failure surface or tunnel below slope =	25	m				Unit wt. =	0.027	MN/n3
Output:	stress =	0.68	MPa	mb =	0.82		s =	0.0004	
	a =	0.5		sigtm =	-0.0051	MPa	A =	0.4516	
	B =	0.7104		k =	3.95		phi =	36.58	degrees
	coh =	0.136	MPa	sigcm =	0.54	MPa	E =	1000.0	MPa
Calculation:									Sums
sig3	1E-10	0.10	0.19	0.29	0.39	0.48	0.58	0.68	2.70
sig1	0.20	1.01	1.47	1.84	2.18	2.48	2.77	3.04	14.99
ds1ds3	21.05	5.50	4.22	3.64	3.29	3.05	2.88	2.74	46.36
sign	0.01	0.24	0.44	0.62	0.80	0.98	1.14	1.31	5.54
tau	0.04	0.33	0.50	0.64	0.76	0.86	0.96	1.05	5.14
x	-2.84	-1.62	-1.35	-1.20	-1.09	-1.01	-0.94	-0.88	-10.94
y	-2.37	-1.48	-1.30	-1.19	-1.12	-1.06	-1.02	-0.98	-10.53
xy	6.74	2.40	1.76	1.43	1.22	1.07	0.96	0.86	16.45
xsq	8.08	2.61	1.83	1.44	1.19	1.02	0.88	0.78	17.84
sig3sig1	0.00	0.10	0.28	0.53	0.84	1.20	1.60	2.05	7
sig3sq	0.00	0.01	0.04	0.08	0.15	0.23	0.33	0.46	1
taucalc	0.04	0.32	0.49	0.63	0.76	0.87	0.97	1.07	
sig1sig3fit	0.54	0.92	1.30	1.68	2.06	2.45	2.83	3.21	
signtaufit	0.14	0.31	0.46	0.60	0.73	0.86	0.98	1.11	
Cell formulae:									
	stress = if(depth>30, sigci*0.25, depth*unitwt*0.25)								
	mb = mi*EXP((GSI-100)/28)								
	s = IF(GSI>25, EXP((GSI-100)/9), 0)								
	a = IF(GSI>25, 0.5, 0.65-GSI/200)								
	sigtm = 0.5*sigci*(mb-SQRT(mb^2+4*s))								
	sig3 = Start at 1E-10 (to avoid zero errors) and increment in 7 steps of stress/28 to stress/4								
	sig1 = sig3+sigci*(((mb*sig3)/sigci)+s)^a								
	ds1ds3 = IF(GSI>25, (1+(mb*sigci)/(2*(sig1-sig3))), 1+(a*mb^a)*(sig3/sigci)^(a-1))								
	sign = sig3+(sig1-sig3)/(1+ds1ds3)								
	tau = (sign-sig3)*SQRT(ds1ds3)								
	x = LOG((sign-sigtm)/sigci)								
	y = LOG(tau/sigci)								
	xy = x*y x sq = x^2								
	A = acalc = 10^(sumy/8 - bcalc*sumx/8)								
	B = bcalc = (sumxy - (sumx*sumy)/8)/(sumxsq - (sumx^2)/8)								
	k = (sumsig3sig1 - (sumsig3*sumsig1)/8)/(sumsig3sq - (sumsig3^2)/8)								
	phi = ASIN((k-1)/(k+1))*180/PI()								
	coh = sigcm/(2*SQRT(k))								
	sigcm = sumsig1/8 - k*sumsig3/8								
	E = IF(sigci>100, 1000*10^((GSI-10)/40), SQRT(sigci/100)*1000*10^((GSI-10)/40))								
	phit = (ATAN(acalc*bcalc*(signt-sigtm)/sigci)^(bcalc-1))*180/PI()								
	coht = acalc*sigci*(signt-sigtm)/sigci^bcalc-signt*TAN(phit*PI()/180)								
	sig3sig1 = sig3*sig1 sig3sq = sig3^2								
	taucalc = acalc*sigci*(sign-sigtm)/sigci^bcalc								
	s3sift = sigcm+k*sig3								
	sntaufit = coh+sign*TAN(phi*PI()/180)								

Para túneis profundos os valores das constantes de Mohr-Coulomb e o ângulo de atrito podem ser calculados com base no quadro 7.

Hoek & Marinos (1997, 1998, 2000) apresentaram correlações entre o GSI, o índice do material (m_i) e a razão entre a coesão e a resistência à compressão uniaxial, ângulo de atrito e módulo de deformabilidade, que se apresentam nas figuras seguintes.

A equação seguinte determina o valor da resistência à compressão uniaxial com base no gráfico apresentado na Figura 19 (adaptado de Hoek & Marinos, 2000):

$$\sigma_{cm} = (0.0034m^{0.8})\sigma_{ci} \{1.029 + 0.025e^{(-0.1m_i)}\}^{GSI}$$

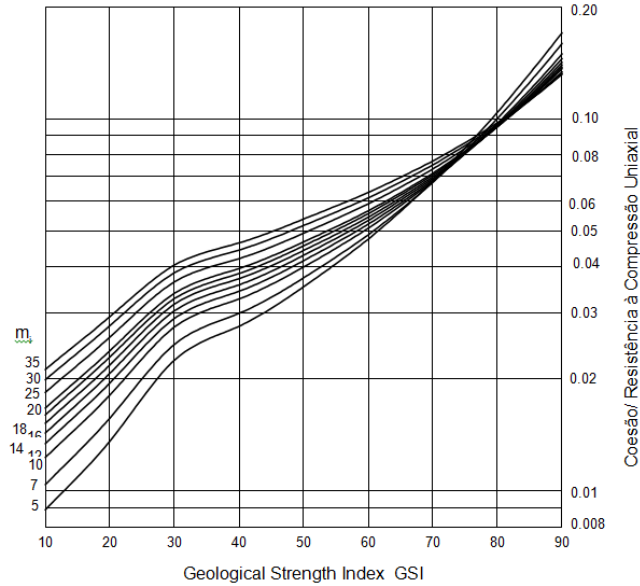


Figura 19. Correlação entre a razão da coesão/ resistência à compressão uniaxial, o GSI e o índice do material (adaptado de Hoek & Marinos, 2000)

Os restantes parâmetros definidos podem ser obtidos pelos gráficos apresentados nas figuras 20 a 22.

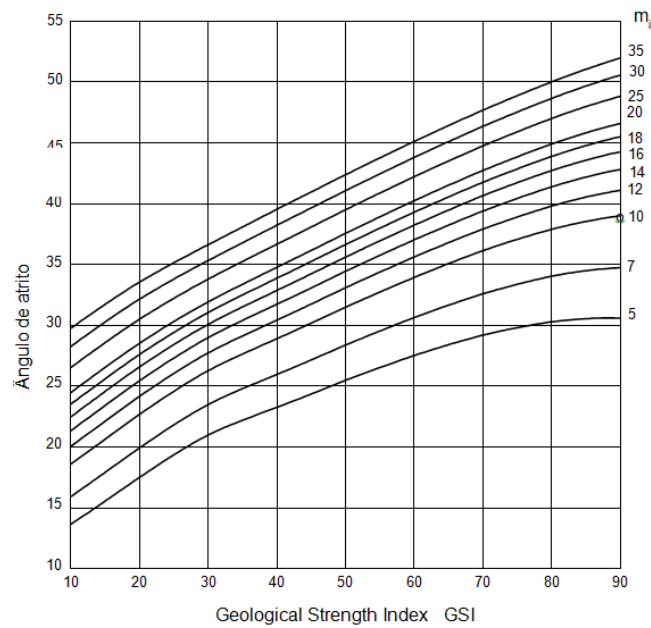


Figura 20. Correlação entre ao ângulo de atrito, o GSI e o índice do material para profundidades superiores a 30m (adaptado de Hoek & Marinos, 2000)

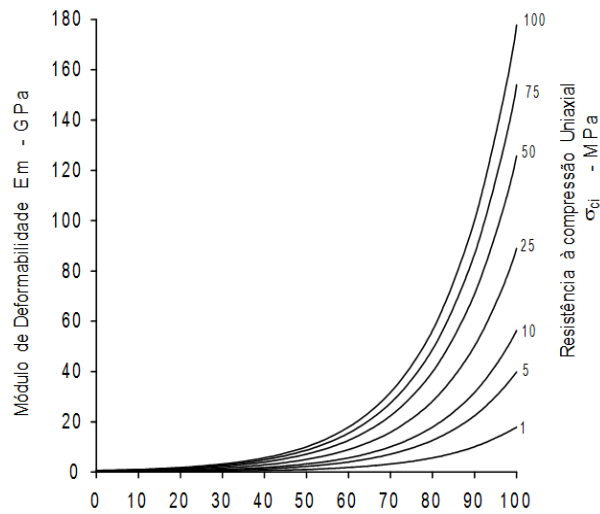


Figura 21. Correlação entre o Módulo de Deformabilidade, a resistência à compressão uniaxial e o GSI (adaptado de Hoek & Marinos, 2000)

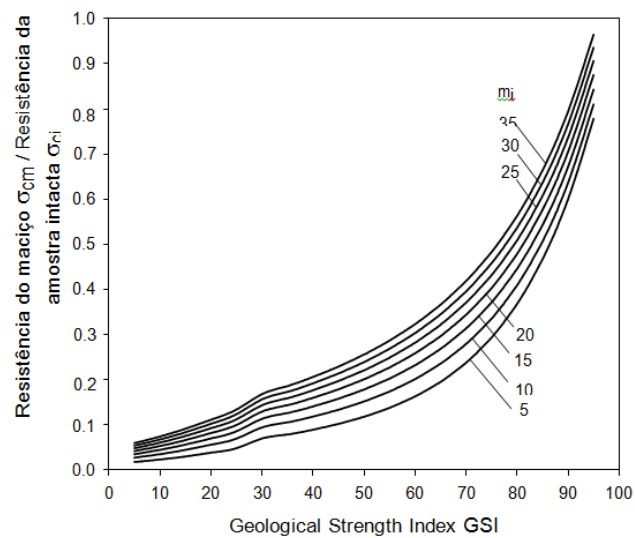


Figura 22. Correlação entre a razão da resistência do maciço e a resistência da amostra intacta, o índice do material m , e o GSI (adaptado de Hoek & Marinos, 2000)

2.4. A influência do tipo de rocha na aplicação do GSI

A resistência de um maciço rochoso depende das propriedades dos blocos rochosos e da liberdade que os mesmos têm em deslizar e rodar quando sujeitos à deformação, esta liberdade é controlada pela geometria dos blocos e pelas características das superfícies das discontinuidades. Blocos angulares e com superfícies limpas e rugosas conferem ao maciço resistência superior a blocos arredondados e com as discontinuidades preenchidas por material alterado.

A classificação GSI, resultado de uma estimativa por observação visual dos maciços rochosos, baseia-se na litologia, estrutura do maciço e nas condições das descontinuidades que ocorrem no maciço e, como já exposto depende da blocometria e das características das descontinuidades, assim, a aplicação do sistema de classificação é fortemente influenciada pelo tipo de formação geológica em causa (Hoek & Marinos, 2001). A figura 23 apresenta intervalos de valores de GSI típicos de alguns tipos de rocha.

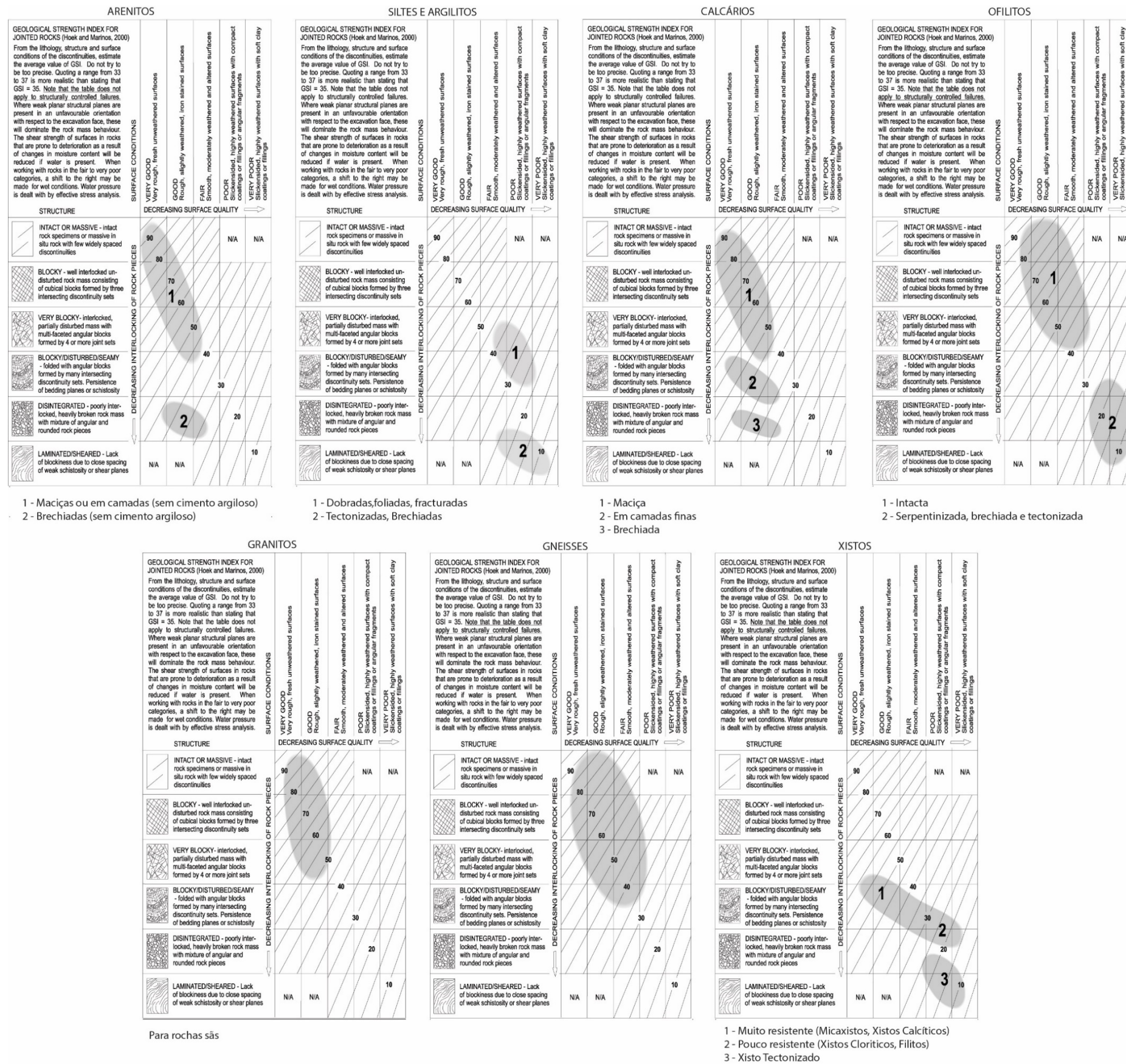


Figura 23. Intervalo de valores prováveis de GSI para alguns tipos de rocha (adaptado de Hoek, 2001).

2.5. Recomendações práticas para o uso do GSI

- ***Quando não usar o GSI***

O sistema de classificação do GSI baseia-se no pressuposto de os maciços possuírem descontinuidades com orientação aleatória, ou seja, o comportamento estrutural do maciço é independente da direcção das tensões aplicadas, assim este sistema de classificação não deve ser aplicado em maciços que apresentam orientação estrutural bem definida.

É também pouco recomendado o uso do GSI em maciços com resistência elevada e que apresentam poucas descontinuidades, tendo estas grandes espaçamentos entre elas, sobretudo se este espaçamento se aproximar das dimensões das estruturas escavadas.

- ***A descrição geológica no quadro de classificação do GSI***

A escolha no quadro de classificação do campo para enquadrar um determinado maciço rochoso não se deve limitar às similaridades visuais entre o maciço e as imagens apresentadas no ábaco, as descrições nele presente devem ser atenciosamente levadas em conta para seleccionar um correcto enquadramento do maciço observado que por vezes pode ser enquadrado entre dois campos.

- ***Extrapolação do GSI para o maciço envolvente***

Os principais campos de aplicação do GSI são:

- Afloramentos
- Taludes escavados e frentes de escavação de túnel
- Tarolos de sondagem

Os afloramentos são de uma utilidade inestimável na fase inicial dos projectos, é o primeiro contacto com o maciço a trabalhar; contudo, por se encontrar à superfície o seu aspecto visual poderá estar condicionado pela acção dos agentes da geodinâmica externa. Assim é fundamental que a caracterização tenha em conta este factor e sempre possível que sejam criados acessos (através de valas e/ou trincheiras) para observação do maciço para lá da zona afectada pela meteorização superficial.

Relativamente aos taludes escavados e às frentes de escavação de túnel são os casos onde as superfícies observadas apresentam estrutura mais próxima à do maciço envolvente sendo as variações nas condições geomecânicas provocadas pelos métodos construtivos (mecânicos ou com recurso a explosivos) e pela natural decompressão dos maciços no decorrer da escavação. Assim os geo-profissionais que usam o GSI devem tentar observar para o maciço envolvente considerando os danos provocados pelo método construtivo e dando maior atenção às estruturas inerentes do maciço.

Para os tarolos de sondagem, considerando que estes são um excelente método de prospecção do maciço em profundidade, a maior dificuldade é a extrapolação da informação de uma sondagem para o maciço envolvente. Esta dificuldade pode ser minimizada com a conjugação da informação de diferentes sondagens e com a execução de sondagens inclinadas.

- ***Abertura e preenchimento das descontinuidades***

Sendo a resistência de um maciço dependente da blocometria do mesmo, estas duas características influenciam fortemente as propriedades do maciço. Os preenchimentos das descontinuidades estão contemplados no quadro de classificação do GSI e devem ser tidos em conta na sua aplicação. O tipo de preenchimento influencia fortemente a estabilidade da estrutura do maciço uma vez que este pode (dependendo da sua natureza) diminuir em grande escala o atrito entre as superfícies.

- ***A influência da água***

A presença de água no interior dos maciços reduz a resistência dos mesmos na medida em que promove a lavagem dos materiais de preenchimento das descontinuidades e potência a degradação dos mesmos. No caso dos preenchimentos argilosos as superfícies das descontinuidades sofrem diminuição do ângulo de atrito quando o preenchimento contacta com água intersticial. A água pode criar ainda tensões adicionais no interior do maciço.

- ***Anisotropia***

Como já exposto o critério de rotura Hoek-Brown supõe a sua aplicação em maciços isotrópicos, sendo que a rotura não ocorre em planos preferenciais e com orientações específicas; nestes casos o GSI não deve ser usado uma vez que os processos de rotura são regulados pelas tensões de cisalhamento das descontinuidades e não pelas tensões aplicadas ao maciço. Em alguns casos poderá ser considerada uma anisotropia do maciço (falha regional, zonas de cisalhamento, zona

com maior grau de alteração) como elemento de maior fraqueza no maciço e fazer uma classificação mais conservadora.

- ***Aplicação do GSI a grandes profundidades***

As grandes profundidades (superiores a 1000 metros) as rochas de elevada resistência apresentam características semelhantes ao maciço intacto e inalterado, sendo que o valor de GSI será próximo de 100 e os processos de rotura são do tipo frágil originando em casos extremos fenómenos de “rockburst”, nestes casos a aplicação deste sistema de classificação deixa de ser razoável. Ocorrendo fenómenos de perturbação tectónica que se desenvolvem em profundidade o uso do GSI volta a fazer sentido considerando maior variação das características do maciço.

- ***Rochas com baixa resistência***

Quando se lida com rochas de baixa resistência, mas formadas em ambientes com condições estáveis ou ambientes pós-tectónicos os maciços podem apresentar poucas descontinuidades e mesmo os planos de estratificação, quando existentes, podem não estar claramente visíveis. Assim na aplicação do GSI estes maciços podem ser enquadrados nas categorias mais altas quanto à blocometria (“Blocky” ou “Massive”), contudo no que respeita às características das descontinuidades estas não podem ser classificadas acima de razoáveis (“Fair) (Hoek, 2007)

2.6. Interacção com outras classificações geomecânicas e correlações

Primeiramente importa ressaltar que a criação do sistema de classificação GSI não pretendeu substituir as classificações de RMR e Q, mas sim um complemento a estas e uma alternativa a ser aplicada de modo mais expedito e célere no apoio à tomada de decisão. Por se basear na observação directa do maciço, o GSI pode ser obtido no local de observação sem ter de recorrer a ensaios laboratoriais.

Foram apresentadas por Hoek (1995) as seguintes correlações com o RMR e Q:

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

Aplicável para valores de $RMR > 23$ e considerando o maciço seco (valor 15 no parâmetro relativo à presença de água) e a orientação das descontinuidades com orientação muito favorável (valor 0 no parâmetro relativo à orientação das descontinuidades).

$$GSI = 9 \ln Q + 44$$

Considerando o maciço também o maciço seco e sujeito a tensões médias ($J_w/SRF=1$)

2.7. Considerações finais

Tal como refere Pinheiro (2013), 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 (e.g., Oliveira, 1987, 1990; Priest, 1993; Hudson & Cosgrove, 1997; Barton & Choubey, 1977; Palmström 1995; Bastos, 1998; Hoek, 2007; Barton & Bieniawski, 2008; de Freitas, 2009; Palmström & Stille, 2010; Singh & Goel, 2011; Chaminé et al., 2013, 2015).

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) e no “Orange Book” da ISRM (2015). 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 (e.g., Lamas, 1993; Dinis da Gama, 1995; Smith, 2004; Chaminé et al., 2015), bem como complementarmente a todos os ensaios geomecânicos “in situ” e/ou em laboratório, previstos pela ISRM (2007, 2015).

A Figura 24 sintetiza 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.

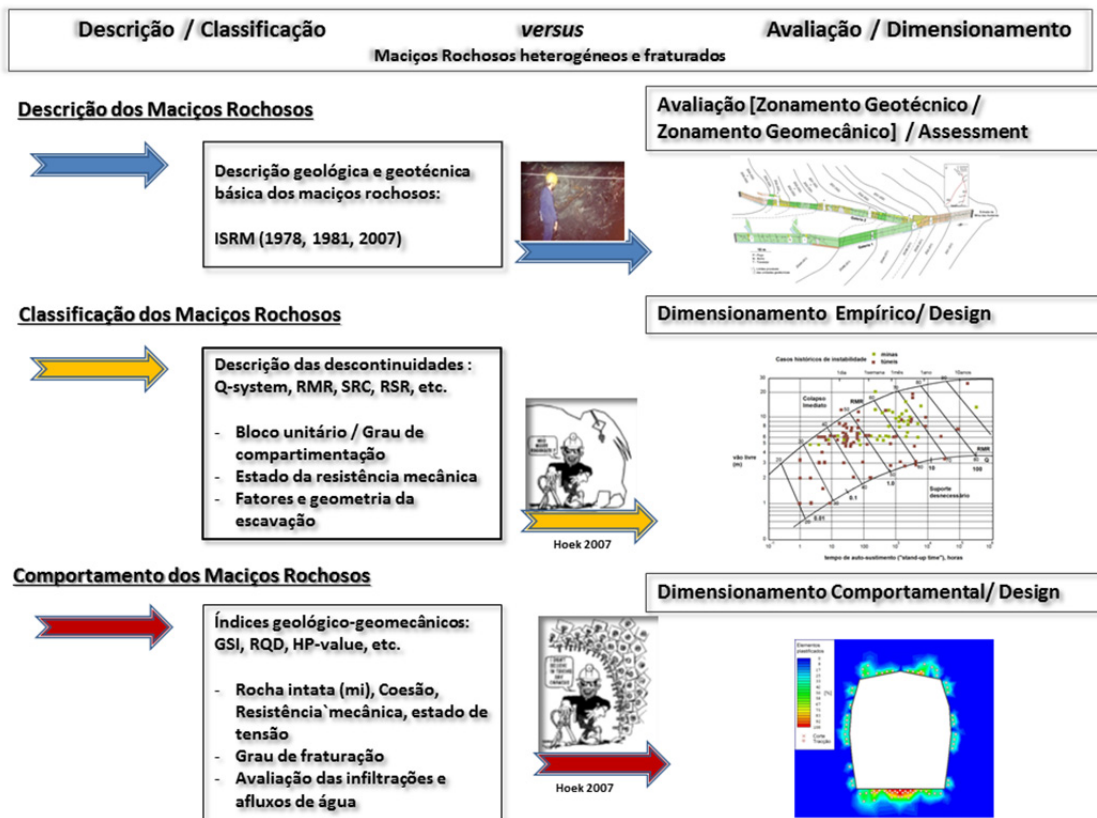


Figura 24. Ilustração esquemática de síntese sobre a caracterização dos maciços rochosos e a utilização das classificações geomecânicas em engenharia de maciços rochosos, no dimensionamento/Design de escavações subterrâneas ou túneis mineiros (adaptado de Chaminé et al., 2015).

3.

**Cartografia de zonamento geotécnico baseada no GSI|2013:
aplicação em frentes de escavação do Túnel do Marão**

“Theory – and even very rigorous theory – is required for training and developing our capacity for correctly interpreting what we observe; but at the same time, with theory alone we could not accomplish anything at all in the field of earthwork engineering, and the more plain facts we can accumulate, the better. I always lose my temper with people who think they have grasped the very core of the substance after they have succeeded in representing some artificially simplified phase of it by means of complicated triple integrals; while at the same time, they have forgotten how the soil really looks. Keen observation is at least as necessary as penetrating analysis” (In: Karl Terzaghi – the engineer as artist, by Richard E. Goodman published by ASCE Press, 1999)

3. Cartografia de zonamento geotécnico baseada no GSI | 2013: aplicação em frentes de escavação do Túnel do Marão

3.1. Apresentação do projecto “túnel do Marão”

3.1.1. Generalidades

O túnel do Marão insere-se no projecto da Auto-Estrada do Marão, desenvolvendo-se a obra entre os concelhos de Amarante e de Vila Real. O túnel do Marão é constituído por dois túneis paralelos, designados por Túnel Norte e Túnel Sul (cada um destinado a um sentido de tráfego distinto), com aproximadamente 5,667 m cada um, perfazendo um total de 11,335 m de túnel, que atravessam a Serra do Marão e que se desenvolvem em sentido aproximado Oeste–Este. Além dos túneis paralelos, o projecto contempla a construção de galerias de ligação entre os túneis, sendo estas consideradas galerias de peões (6), galerias veiculares (6) e um posto técnico (figura 25).

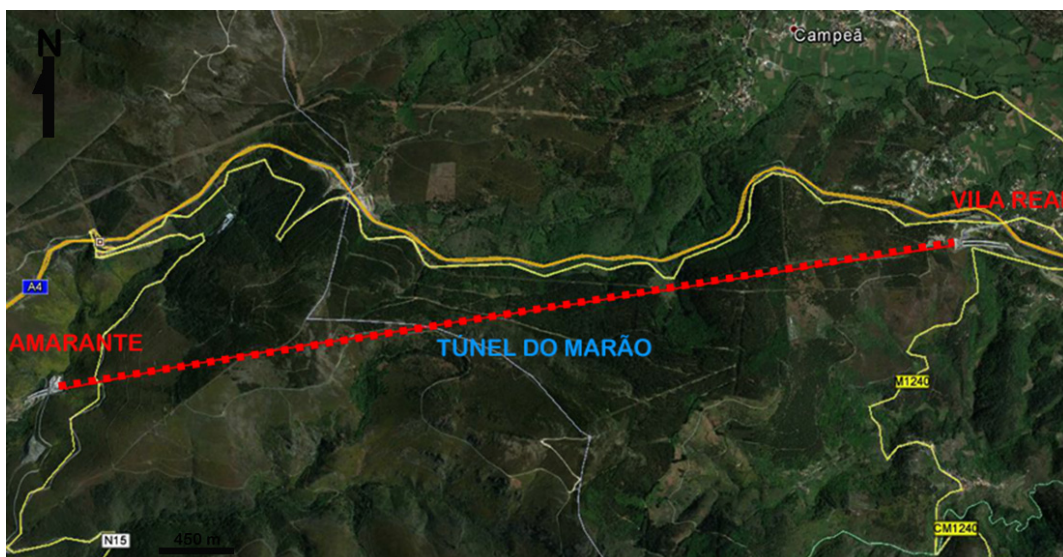


Figura 25. Traçado do “Túnel do Marão” sendo constituído por 2 túneis paralelos (Túnel Norte: Este-Oeste; e Túnel Sul: Oeste-Este), com um extensão de cada túnel a rondar os 5,667 metros; 12 galerias de emergência e 1 posto técnico.

A empreitada teve o seu início em Julho de 2009 e os trabalhos foram suspensos a 22 de Julho de 2011, sendo que ocorreram duas suspensões dos trabalhos por decreto judicial durante dois períodos: de Novembro de 2009 a Maio de 2010, e entre Junho a Agosto de 2010. A empreitada foi retomada em Novembro de 2014 estando a sua conclusão prevista no final do ano 2015, com abertura em pleno ao trânsito em Fevereiro de 2016.

3.1.2. Método construtivo

A construção do túnel do Marão é abordada segundo a filosofia NATM – New Austrian Tunnelling Method (e.g., von Rabcewicz, 1964/65; ITA-Austria, 2012) sendo que cada frente de escavação tem um ciclo de trabalho composto por (figura 26): i) Perfuração; ii) Carregamento com explosivos; iii) Detonação; iv) Remoção de escombros; v) Verificação topográfica e estudos/levantamentos geológico-geotécnicos; vi) Saneamento mecânico e reperfilamento; vii) Aplicação de sustimento.

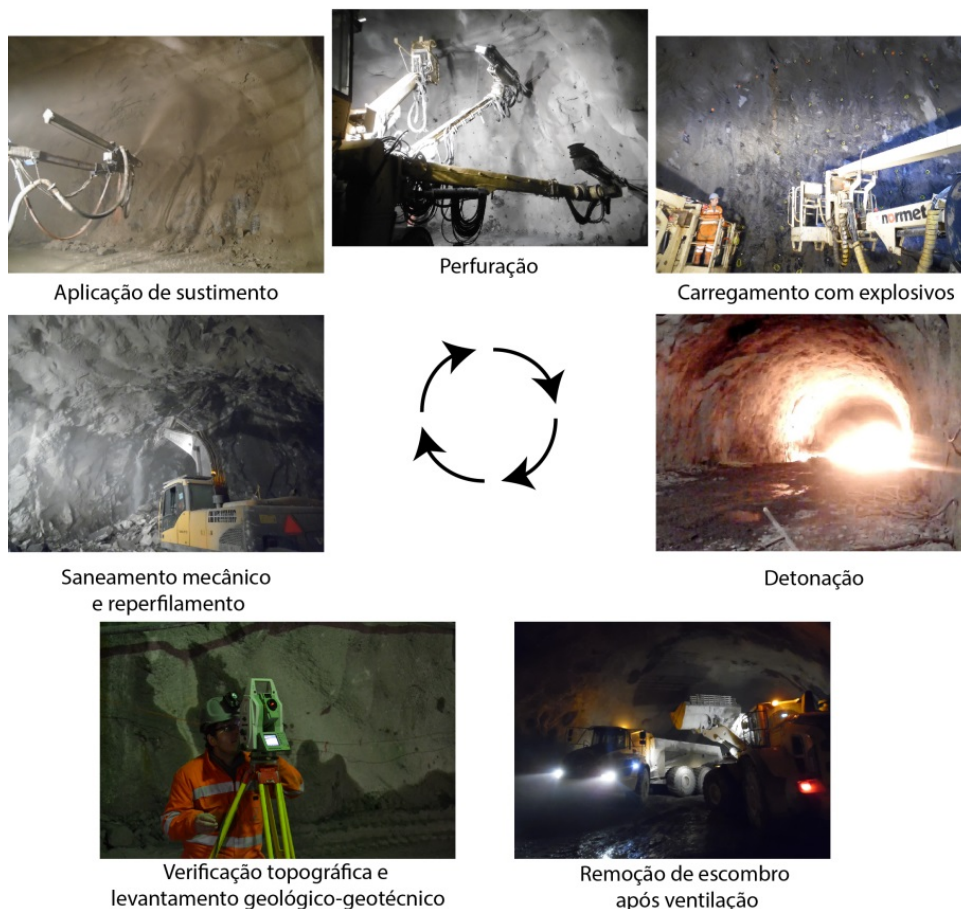


Figura 26. Ciclo de escavação em obras subterrâneas: uma visão integradora.

O comprimento dos avanços é definido com base nas condições do maciço rochoso observado a cada avanço, estando definidos avanços máximos para cada zonamento geotécnico, sendo o sustimento aplicado antes de cada novo avanço.

3.1.3. Sustimento com base nas classificações geomecânicas

O sustimento primário é definido com base nas condições do maciço rochoso observado (zonamento geotécnico geral; figura 27) e de acordo com as classificações geomecânicas (por exemplo, RMR_{89} , GSI_{98}), estando definidos, pelo projectista, três (3) tipos de suporte (quadro 8).

Quadro 8. Parâmetros do projecto considerados para definição de cada zona geotécnica de referência no projecto do Túnel do Marão (elementos do arquivo do projectista).

Suporte tipo	Zona Geotécnica (ZG) de referência	RMR_{89}	GSI_{98}
SP1	ZG1	> 45	> 55
SP2	ZG2	25 – 45	35 – 55
SP3	ZG3	< 25	< 35

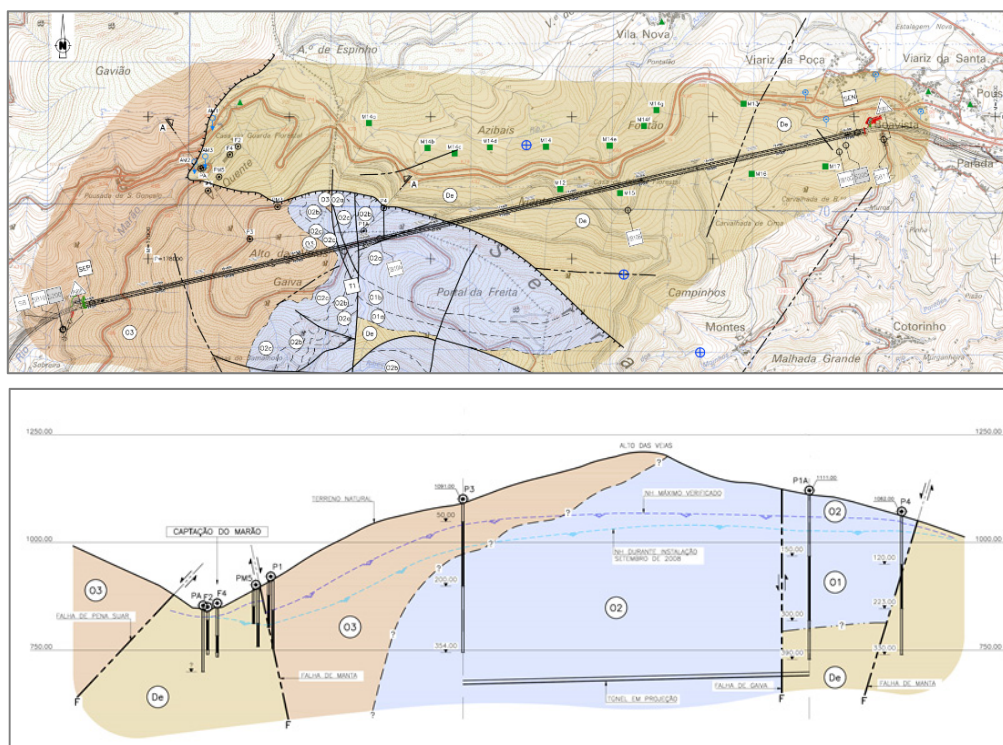


Figura 27. Quadro geológico-geotécnico geral da envolvente ao traçado “Túnel do Marão”: planta e perfil interpretativo (elementos do arquivo do projectista); confrontar com o quadro 8.

Os três tipos de suporte primário contemplam a aplicação de betão projectado reforçado com fibras em espessura variável dependendo das condições geotécnicas, pregagens do tipo “swellex” pontuais ou sistemáticas em condições geotécnicas adversas (SP2), e nos casos de condições geotécnicas mais desfavoráveis (SP3) está contemplada a aplicação de cambotas treliçadas.

3.2. Enquadramento geológico

3.2.1. Geologia Regional

A Serra do Marão insere-se na Zona Centro-Ibérica (Ribeiro et al., 1979, 1990, 2007) sendo constituída por formações autóctones com datações compreendidas entre o Câmbrico e o Devónico Inferior (Pereira, 1987; Pereira et al., 2001). Considerando o modelo geodinâmico proposto para a região por Ribeiro et al. (1988), num perfil efectuado segundo a direcção WSW-ENE, a localização da Serra do Marão ocupa uma posição central na estrutura em leque que assume a Zona Centro-Ibérica, apresentando as dobras da primeira fase de deformação, uma vergência geralmente para NE (Dias & Ribeiro, 1995). No seu conjunto, a serra do Marão constitui uma macro estrutura geológica do tipo anticlinal. Trata-se de uma dobra de 1ª ordem cujos flancos são constituídos por dobras de ordem menor.

3.2.2. Litoestratigrafia

Do ponto de vista estratigráfico é possível identificar várias litologias agrupando-as em unidades litoestratigráficas distintas e cartografáveis do ponto de vista regional. A coluna litoestratigráfica da região é resumidamente constituída, do topo para a base, pelas unidades regionais seguintes caracterizadas por Coke (1992, 2000) e definidas formalmente por Sá et al. (2005).

Na área identificam-se as seguintes formações geológicas (Coke, 2000), figura 28:

- **Ordovícico**
 - **Formação Moncorvo** (Oretaniano (?)) – Dobrotiviano ou “Landeiliano – Lanvirniano inferior”) inicia-se com o desaparecimento dos leitos centimétricos de metassiltitos. A Formação Moncorvo é uma formação espessa e monótona de filitos cinzento claros ou escuros, apresentando em toda a área observada, cristais de quistolites, que aumentam de tamanho e de frequência para Oeste com a aproximação ao batólito granítico de Amarante. O limite superior desta unidade não foi determinado, podendo no entanto estar associado à presença de níveis Ode ferro oolítico identificados em vários locais.

-
- **Formação Marão** (Arenigiano médio), subdividido em três membros:
 - **Membro Fragas de Ermida:** constituído por uma alternância de leitos decimétricos a milimétricos de filitos e psamitos dando à unidade aspecto bandado semelhante à Formação Desejosa. Os leitos bem definidos de psamitos apresentam frequentes variações laterais de espessuras, assumindo a forma de lentículas.
 - **Membro Malhada:** caracterizado pela presença de ferro que ocorre disseminado em algumas bancadas de quartzito ou filitos e praticamente pela ausência de conglomerados. A sequência é constituída por bancadas de quartzitos maciços, muito puros de espessuras métricas a decimétricas, às vezes negros, metagrauvaques em bancadas decimétricas e leitos decimétricos a centimétricos de filitos negros intercalados nos anteriores. As bancadas de quartzitos diminuem de espessura para o topo da unidade; onde ocorrem com maior frequência e espessura as bancadas de material filítico que, com aquelas alternam. Para esta unidade foi determinada uma espessura próxima de 120 m.
 - **Membro Ermida:** constituído essencialmente por quartzitos em bancadas métricas, alternando com leitos centimétricos a decimétricos de filitos ou psamitos muito bem definidos. A ocorrência de bancadas conglomeráticas constituídas por elementos essencialmente quartzosos é muito frequente. Estas bancadas diferenciam-se das que ocorrem no membro anterior pela maior competência devido à maior percentagem de quartzo, facto que é traduzido pela cor branca acinzentada. A espessura desta unidade, na encosta sul do vale do rio das Bojas, onde foi definido o perfil tipo, ronda os 110 m.
 - **Formação Vale das Bojas** (Arenigiano inferior a médio), subdividida em dois membros:
 - **Membro Bojas:** Constituído por alternância de bancadas métricas a decimétricas de conglomerados polimíticos suportados pela matriz e níveis menos espessos de metatufitos psamíticos, de cor bege rosada ou metassiltitos com uma componente vulcânica nítida. A espessura desta unidade é de cerca de 120 m.
 - **Membro Freitas:** distingue-se do anterior pelo aspecto mais estratificado e presença anormalmente abundante de clastos de quartzo filoniano. Neste membro é comum, em alguns locais, a ocorrência de magnetite disseminada nos leitos conglomeráticos. A espessura ronda os 110 m.
 - **Câmbrico**
 - **Grupo do Douro – Formação da Desejosa**

A Formação da Desejosa representa o topo do Grupo do Douro na área em estudo. Trata-se de uma sequência monótona de filitos negros ou cinzentos em bancadas centimétricas, alternando com leitos de espessuras geralmente inferiores a um centímetro, de material siltítico, onde mais raramente se intercalam algumas bancadas de metagrauvaques.

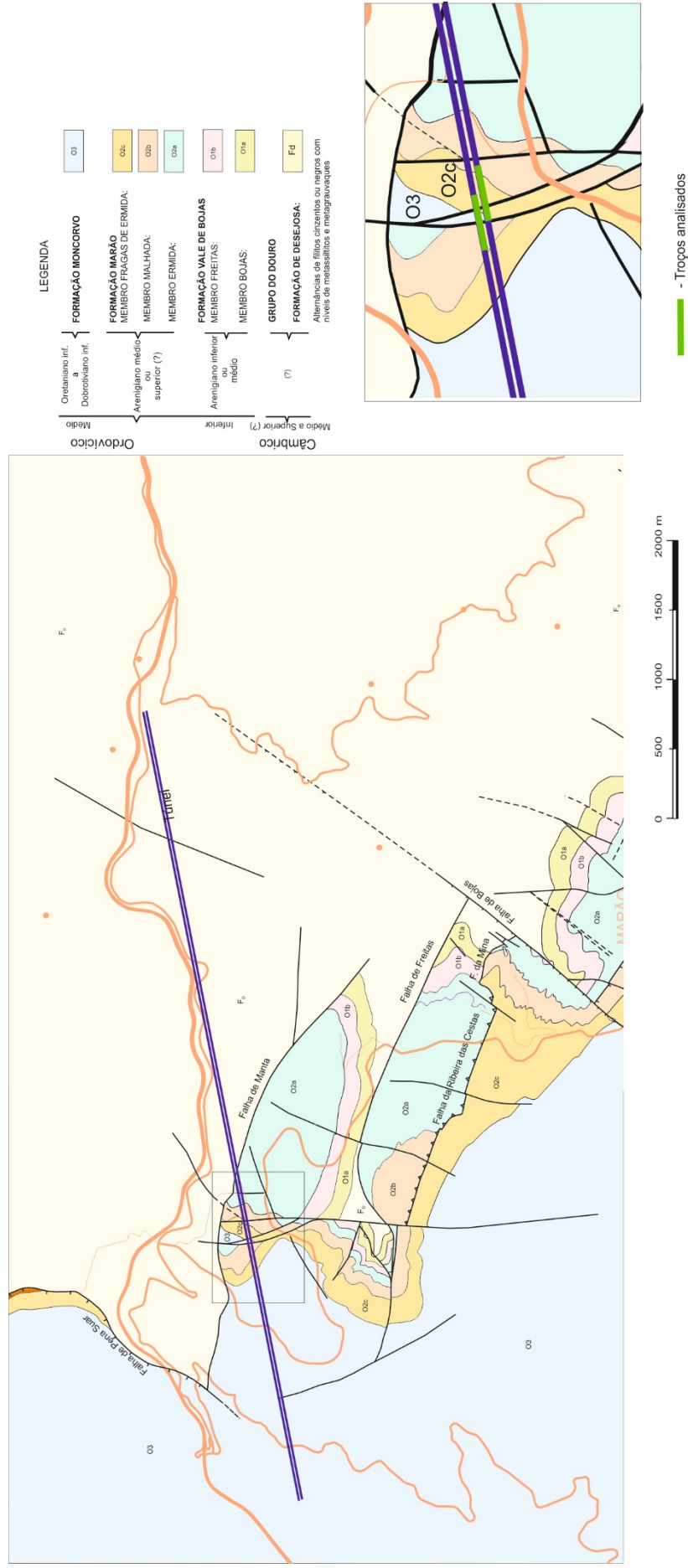


Figura 28. Esboço geológico representativo da cartografia geológica regional de superfície, mostrando as principais estruturas bem como a posição do túnel e a localização dos trabalhos de prospeção efectuados (adaptado de Coke, 2000).

3.3. Levantamentos de frente de escavação na Frente Poente do Túnel do Marão

No decorrer dos trabalhos de escavação das frentes Norte e Sul da frente Poente, foram realizadas cartografias (exemplos em anexo) de cada frente de escavação a cada avanço, tendo sido cartografados 305 metros lineares no conjunto dos dois túneis (151 metros no túnel Norte e 154 metros no túnel Sul). Os levantamentos foram realizados com recurso à técnica de amostragem linear tendo-se registado os aspectos geológicos-geotécnicos relevantes na análise comportamental do maciço e para a definição do sustimento a aplicar. A cada avanço foram também realizados duas estações geomecânicas *in situ* com recurso ao esclerómetro portátil (Martelo de Schmidt, tipo L) procurando-se que as zonas a ensaiar fossem as mais representativas do estado do avanço escavado, tendo sido realizados 148 ensaios no conjunto dos dois túneis.

3.3.1. Litologia observada

3.3.1.1. Túnel Poente Norte

No túnel Poente Norte foram cartografados 151 metros entre os pk's (pontos quilométricos) 15+585,00 e 15+736,00 tendo-se observado três litologias fundamentais:

- Entre os pk 15+585,00 e 15+600,00 observou-se maciço constituído por quartzitos finos de tonalidade cinzenta.
- Entre os pk's 15+600,00 e 15+638,50 observou-se maciço constituído por quartitos finos de tonalidade cinzenta em contacto com xisto cinzento de textura fina com xistosidade segundo E-W;80°S. O contacto era materializado por uma falha de atitude N60°W/E-W;90°, com 30cm de espessura e enchimento de material xistento oxidado, de textura argilosa.
- Entre os pk's 15+638,50 e 15+710,50 observou-se maciço constituído por xisto cinzento de textura fina com xistosidade a variar entre E-W;80°S e N60°W;40°SW.
- Entre os pk's 15+710,50 e 15+720,00 observou-se maciço constituído por xisto cinzento de textura fina com xistosidade segundo N60°W;40°SW e metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, conferindo ao maciço um aspecto listrado sendo o contacto feito por discordância segundo N25°E.
- Entre os pk's 15+720,00 e 15+736,00 observou-se maciço constituído por metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, conferindo ao maciço um aspecto listrado.

3.3.1.2. Túnel Poente Sul

No túnel Poente Sul foram cartografados 154 metros entre os pk's 15+733,00 e 15+887,00 tendo-se observado três litologias dominantes (figuras 29 a 33):

- Entre os pk 15+733,00 e 15+737,00 observou-se maciço constituído por xisto cinzento de textura fina com xistosidade segundo E-W; 80°S.
- Entre os pk's 15+737,00 e 15+748,50 observou-se maciço constituído por quartzitos finos de tonalidade cinzenta, sendo o contacto com os xistos cinzentos expresso por um filão de quartzo com 10 cm de espessura e com atitude N14°W;90°.
- Entre os pk's 15+748,50 e 15+753,00 observou-se o contacto entre os quartzitos finos de tonalidade cinzenta e os metassedimentos, numa discordância segundo N44°W.
- Entre os pk's 15+753,00 e 15+887,00 observou-se maciço constituído por metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassilitos, conferindo ao maciço um aspecto listrado.

Em ambos os túneis observaram-se várias ocorrências quartzosas, nas zonas constituídas por xisto em forma de filões com espessuras a variar entre 5 e 20 centímetros, com atitude variável próxima de ENE-SSW e também em filonetes finos em preenchimento de algumas descontinuidades. Nas zonas constituídas por quartzitos foram observados com frequência filões decimétricos com forma sigmoidal e algumas massas de quartzo (figura 29).



Figura 29. Filonetes de quartzo nos materiais metassedimentares.



Figura 30. Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassilitos, conferindo ao maciço um aspecto listrado.



Figura 31. Contacto entre os metassedimentos e o xisto cinzento por um filão de quartzo.



Figura 32. Xisto cinzento com xistosidade segundo E-W;80°S.



Figura 33. Quartzito fino em contacto com os metassedimentos.

3.3.2. Grau de Alteração e Estado da Fracturação

3.3.2.1. Túnel Norte

No decorrer dos levantamentos realizados no túnel Norte observou-se maciço são (W_1) na generalidade, com excepção da zona de contacto entre os quartzitos e os xistos onde foi observada uma faixa com cerca de 2 metros de espessura de maciço medianamente alterado (W_3) a alterado (W_4) a acompanhar uma estrutura regional (falha geológica) que marca o contacto entre as duas litologias, e uma outra zona entre os pk's 15+652,00 e 15+665,00 onde se observou maciço constituído por xisto alterado (W_4) com pontuais oxidações das paredes das descontinuidades.

Relativamente ao grau de fracturação, em toda a extensão cartografada observaram-se fracturas afastadas (F_2), [75 – 180cm] a medianamente afastadas (F_3), [20 – 55cm] sendo que pontualmente foram observadas fracturas próximas (F_4), [10 – 20 cm].

3.3.2.2. Túnel Sul

O maciço observado na cartografia túnel Sul apresentou-se são (W_1) na maioria do troço com algumas zonas de excepção, nomeadamente na proximidade do pk 15+795,00 onde foram observadas duas faixas com cerca de 1 metro de espessura de maciço pouco a medianamente alterado (W_2 a W_3) com o maciço a apresentar ligeira oxidação e preenchimento de algumas descontinuidades, entre o pk 15+800,00 e 15+825,00 foi observado maciço são a pouco alterado (W_1 a W_2) e entre o pk 15+860,00 e 15+870,00 observou-se uma zona de maciço medianamente alterado (W_3), com oxidação do maciço e ocorrências pontuais de desagregação do maciço.

No que ao grau de fracturação diz respeito, o mesmo variou maioritariamente entre fracturas afastadas (F_2), [70 – 140cm] e medianamente afastadas (F_3), [35 – 60cm] tendo-se observado algumas zonas com maior intensidade de fracturação, nomeadamente ao pk 15+795,00 nas já referidas faixas com maior alteração onde se observaram fracturas próximas (F_4), e entre os pk's 15+860,00 e 15+870,00 onde se observou maior alteração do maciço onde as descontinuidades ocorriam também próximas (F_4), [10 – 20cm].

3.3.3. Diaclasamento

Como já referido, nos levantamentos geológicos-geotécnicos realizados foram registadas as características das discontinuidades observadas a cada avanço com recurso à técnica de amostragem linear, num total de 1077 discontinuidades levantadas no conjunto dos dois túneis. Com os dados relativos à atitude destas discontinuidades foi possível a análise estatística destes dados sobre a forma de projecção estereográfica numa rede de Schmidt-Lambert. Esta análise foi feita separadamente para as litologias observadas, as figuras 34 a 41 apresentam os diagramas de isodensidades obtidos.

No túnel Norte foram observadas as seguintes famílias de discontinuidades em cada litologia (quadro 9).

Quadro 9. Planos médios das famílias de discontinuidades observadas no túnel poente Norte (cf. figuras 34 a 37).

<p><u>Geral:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • F1 - N69°W;71°SW • F2 – N80°E;50°NW • F3 – N18°E;86°SE • F4 - N71°E;16°SE 	<p><u>Xisto Cinzento</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • F1 - N67°W;69°SW • F2 - N19°E;86°SE • F3 - N87°E;62°N
<p><u>Metassedimentos:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • F1 – N52°W;77°SW • F2 – N25°E;82°SE • F3 – N87°E;54°N 	<p><u>Quartzito Fino:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • F1 - N65°E;81°NW • F2 - N75°W;87°SW • F3 - N06°E;81°E

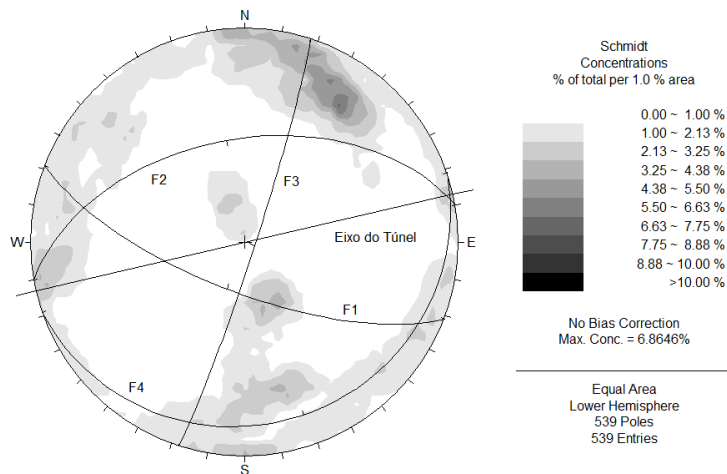


Figura 34. Diagrama de isodensidades das discontinuidades observadas no túnel poente Norte.

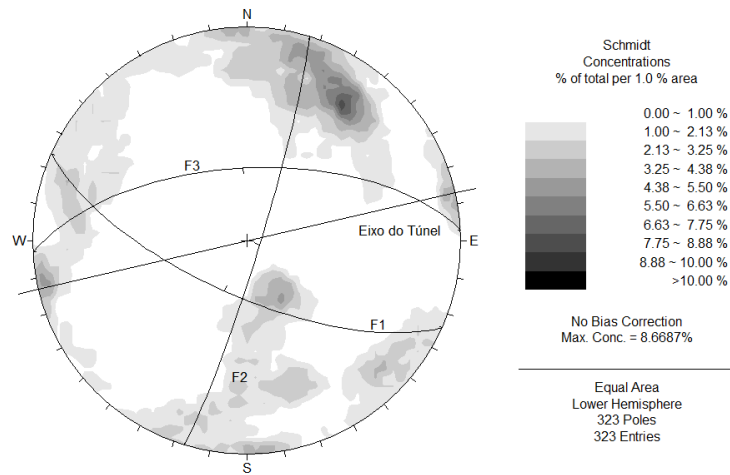


Figura 35. Diagrama de isodensidades das descontinuidades observadas nos xistos cinzentos no túnel ponte Norte.

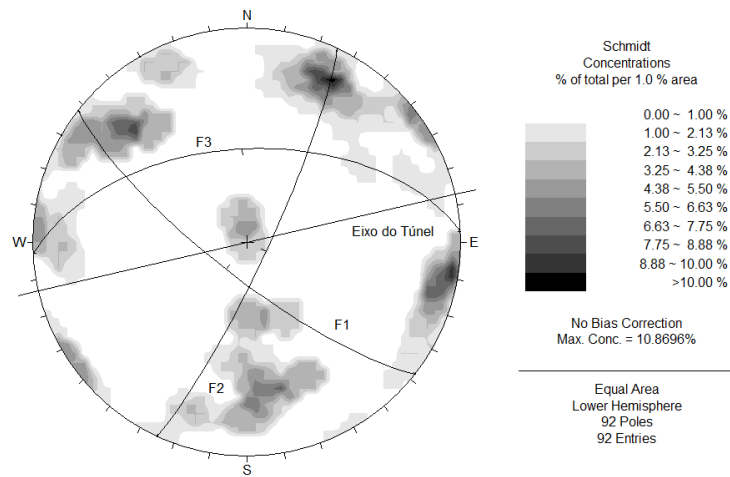


Figura 36. Diagrama de isodensidades das descontinuidades observadas nos metassedimentos no túnel ponte Norte.

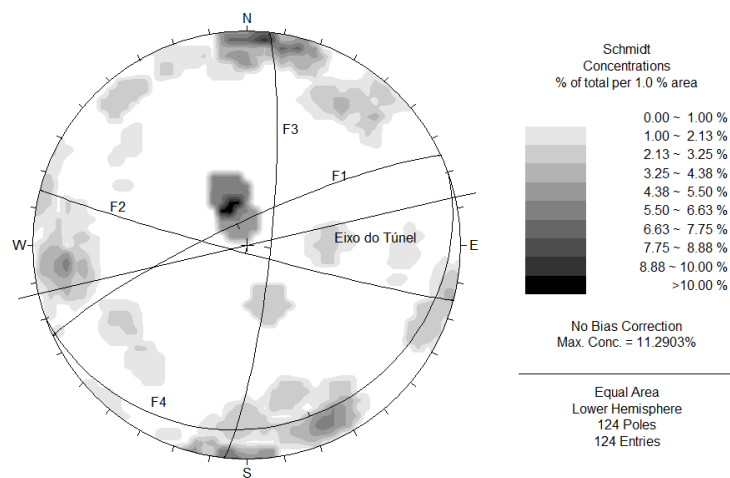


Figura 37. Diagrama de isodensidades das descontinuidades observadas no quartzito fino no túnel ponte Norte.

No túnel Sul foram observadas as seguintes famílias de descontinuidades em cada litologia tal como consta no quadro 10. As figuras 38 a 41 ilustram os diagramas de contorno estrutural para as unidades metassedimentares cartografadas.

Quadro 10. Planos médios das famílias de descontinuidades observadas no túnel poente Sul (cf. figuras 38 a 41).

<u>Geral:</u>	<u>Xisto Cinzento:</u>
<ul style="list-style-type: none"> • F1 - N68°W;76°SW • F2 - N12°E;82°SE • F3 - N82°E;46°NW 	<ul style="list-style-type: none"> • F1 - N65°W;75°NE • F2 - N17°E;81°SE • F3 - N82°W;60°S
<u>Metassedimentos:</u>	<u>Quartzito Fino:</u>
<ul style="list-style-type: none"> • F1 - N69°W;76°SW • F2 - N25°E;81°SE • F3 - N69°E;43°NE 	<ul style="list-style-type: none"> • F1 - N66°W;74°SW • F2 - N10°W;80°NE • F3 - N78°W;61°NE

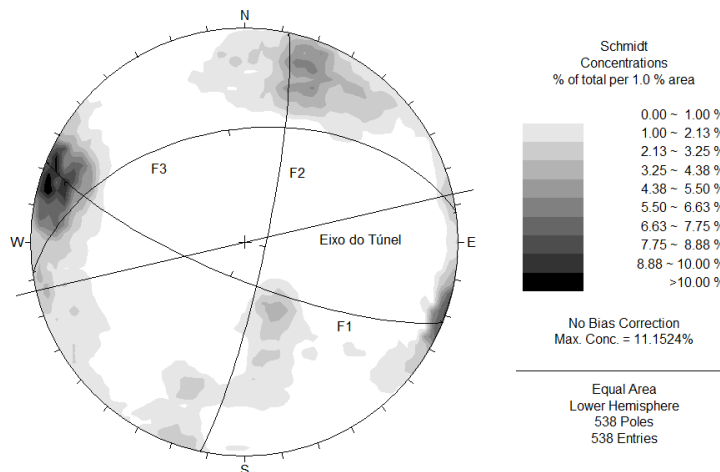


Figura 38. Diagrama de isodensidades das descontinuidades observadas no túnel poente Sul.

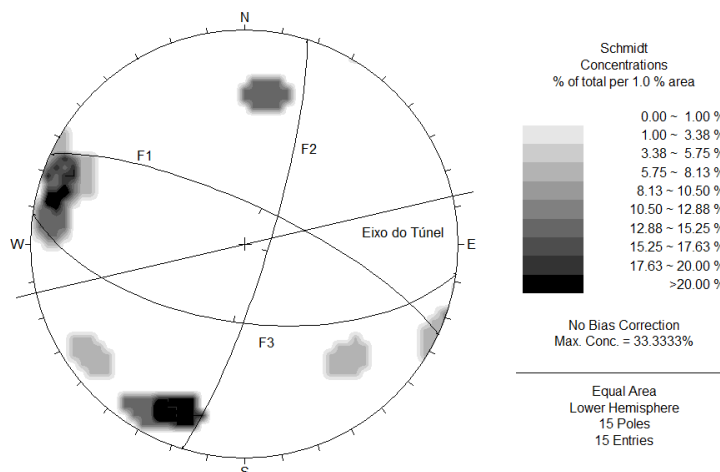


Figura 39. Diagrama de isodensidades das descontinuidades observadas nos xistos cinzentos no túnel poente Sul.

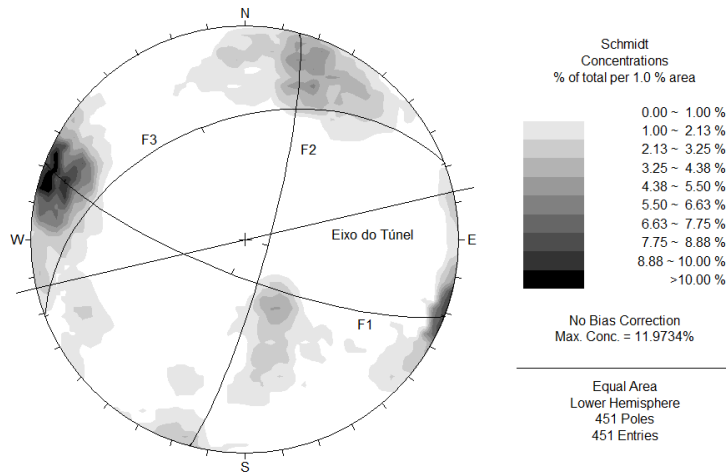


Figura 40. Diagrama de isodensidades das descontinuidades observadas nos metassedimentos no túnel ponte Sul.

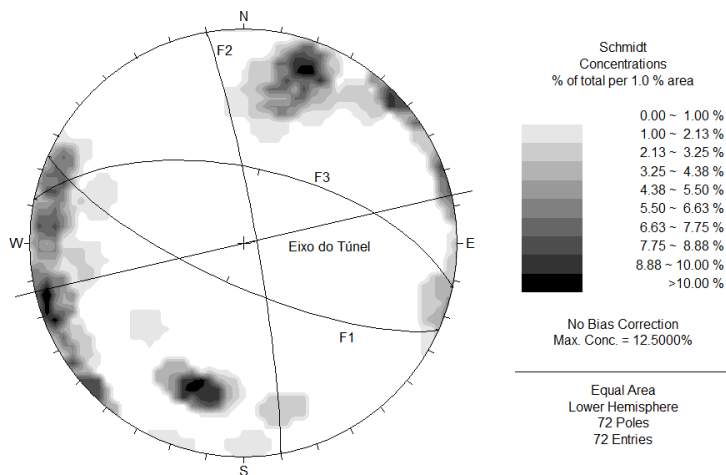


Figura 41. Diagrama de isodensidades das descontinuidades observadas no quartzito fino no túnel ponte Sul.

Procurou-se sintetizar as características das descontinuidades observadas em cada uma das unidades cartografadas nos quadros 11 a 16

Quadro 11. Síntese das características das descontinuidades nos Xistos Cinzentos do Túnel Norte.

Parâmetro (ISRM, 1981)	Tipo	n	%	Distribuição
Tipo de Descontinuidade	Diáclase	387	98.47	
	Falha	5	1.27	
	Fíão	1	0.25	
Famílias Principais	N66°W;69°SW	393 Polos		
	N17°E;85°SE			
	N88°E;62°N			
Grau de Alteração	W1	319	81.17	
	W2	40	10.18	
	W3	28	7.12	
	W4	3	0.76	
	W5	3	0.76	
Abertura (mm)	Fechada	202	51.40	
	Aberta	176	44.78	
	Muito Aberta	15	3.82	
	Valor médio	4.84		
	Mediana	0.50		
Grau de fracturação (cm) {Fracture intercept}	F1	6	1.53	
	F2	204	51.91	
	F3	164	41.73	
	F4	18	4.58	
	F5	1	0.25	
	Valor médio	81.93		
Mediana	65.00			
Comprimento (l) (m)	Continuidade muito baixa <1	0.00	0.00	
	Continuidade baixa 1-3	0.00	0.00	
	Continuidade média 3-10	341.00	86.77	
	Continuidade alta 10-20	52.00	13.23	
	Continuidade muito alta >20	0.00	0.00	
	Valor médio	8.14		
Mediana	8.20			
Curvatura C	C,1	345	87.79	
	C,2	36	9.16	
	C,3	10	2.54	
	C,4	2	0.51	
Rugosidade R	O,1	2	0.51	
	O,2	33	8.40	
	O,3	337	85.75	
	O,4	0	0.00	
	P,2	21	5.34	
	P,3	0	0.00	
Tipo de enchimento	Argiloso Duro	7	1.78	
	Argiloso Mole	48	12.21	
	Quartzo	71	18.07	
	Sem enchimento	267	67.94	
Presença de água	Seca	280	71.25	
	Húmida	106	26.97	
	Fluxo	7	1.78	
Resistência à compressão uniaxial (MPa)	S1	0	0.00	
	S2	37	80.43	
	S3	9	19.57	
	S4	0	0.00	
	S5	0	0.00	
	Valor médio	66.91		
Mediana	67.45			

Quadro 12. Síntese das características das descontinuidades nos Metassedimentos do Túnel Norte

Parâmetro (ISRM, 1981)	Tipo	n	%	Distribuição
Tipo de Descontinuidade	Diáclase	78	96.30	
	Falha	0	0.00	
	Filão	3	3.70	
Famílias Principais	N53°W;54°SW	81 Polos		
	N25°E;82°SE			
	N88°E;77°N			
Grau de Alteração	W1	70	86.42	
	W2	8	9.88	
	W3	3	3.70	
	W4	0	0.00	
	W5	0	0.00	
Abertura (mm)	Fechada	41	50.62	
	Aberta	37	45.68	
	Muito Aberta	3	3.70	
	Valor médio	4.33		
	Mediana	0.50		
Grau de fracturação (cm) (Fracture intercept)	F1	1	1.23	
	F2	49	60.49	
	F3	26	32.10	
	F4	5	6.17	
	F5	0	0.00	
	Valor médio	95.25		
Mediana	80.00			
Comprimento (l) (m)	Continuidade muito baixa <1	0.00	0.00	
	Continuidade baixa 1-3	1.00	1.23	
	Continuidade média 3-10	72.00	88.89	
	Continuidade alta 10-20	8.00	9.88	
	Continuidade muito alta >20	0.00	0.00	
	Valor médio	7.99		
Mediana	7.85			
Curvatura C	C,1	72	88.89	
	C,2	8	9.88	
	C,3	0	0.00	
	C,4	1	1.23	
Rugosidade R	O,1	5	6.17	
	O,2	60	74.07	
	O,3	14	17.28	
	O,4	0	0.00	
	P,2	2	2.47	
	P,3	0	0.00	
Tipo de enchimento	Argiloso Duro	0	0.00	
	Argiloso Mole	7	8.64	
	Quartzo	14	17.28	
	Sem enchimento	60	74.07	
Presença de água	Seca	47	58.02	
	Húmida	32	39.51	
	Fluxo	2	2.47	
Resistência à compressão uniaxial (MPa)	S1	0	0.00	
	S2	37	80.43	
	S3	9	19.57	
	S4	0	0.00	
	S5	0	0.00	
	Valor médio	66.91		
Mediana	67.45			

Quadro 13. Síntese das características das descontinuidades nos Quartzitos do Túnel Norte

Parâmetro (ISRM, 1981)	Tipo	n	%	Distribuição
Tipo de Descontinuidade	Diáclase	120	98.36	
	Falha	2	1.64	
	Filão	0	0.00	
Famílias Principais	N65°E;81°NW	122 Polos		
	N75°W;87°SW			
	N06°E;81°SE			
	N70°E;16°SE			
Grau de Alteração	W1	106	86.89	
	W2	12	9.84	
	W3	2	1.64	
	W4	0	0.00	
	W5	2	1.64	
Abertura (mm)	Fechada	88	72.13	
	Aberta	30	24.59	
	Muito Aberta	4	3.28	
	Valor médio	4.93		
	Mediana	0.10		
Grau de fracturação (cm) (Fracture intercept)	F1	31	25.41	
	F2	76	62.30	
	F3	10	8.20	
	F4	0	0.00	
	F5	5	4.10	
	Valor médio	146.83		
Mediana	125.00			
Comprimento (l) (m)	Continuidade muito baixa <1	0.00	0.00	
	Continuidade baixa 1-3	92.00	75.41	
	Continuidade média 3-10	15.00	12.30	
	Continuidade alta 10-20	15.00	12.30	
	Continuidade muito alta >20	0.00	0.00	
	Valor médio	8.42		
Mediana	8.75			
Curvatura C	C,1	103	84.43	
	C,2	14	11.48	
	C,3	3	2.46	
	C,4	2	1.64	
Rugosidade R	O,2	1	0.82	
	O,3	103	84.43	
	O,4	8	6.56	
	P,2	3	2.46	
	P,3	7	5.74	
Tipo de enchimento	Argiloso Duro	10	8.20	
	Argiloso Mole	2	1.64	
	Quartzo	27	22.13	
	Sem enchimento	83	68.03	
Presença de água	Seca	103	84.43	
	Húmida	19	15.57	
Resistência à compressão uniaxial (MPa)	S1	0	0.00	
	S2	16	88.89	
	S3	2	11.11	
	S4	0	0.00	
	S5	0	0.00	
	Valor médio	75.41		
Mediana	71.25			

Quadro 14. Síntese das características das descontinuidades nos Xistos Cinzentos do Túnel Sul

Parâmetro (ISRM, 1981)	Tipo	n	%	Distribuição
Tipo de Descontinuidade	Diáclase	13	100.00	
	Falha	0	0.00	
	Filão	0	0.00	
Famílias Principais	N65°W;75°NE	13 Polos		
	N17°E;81°SE			
	N82°W;60°SW			
Grau de Alteração	W1	13	100.00	
	W2	0	0.00	
	W3	0	0.00	
	W4	0	0.00	
	W5	0	0.00	
Abertura (mm)	Fechada	10	76.92	
	Aberta	3	23.08	
	Muito Aberta	0	0.00	
	Valor médio	0.35		
	Mediana	0.10		
Grau de fracturação (cm) (Fracture intercept)	F1	2	15.38	
	F2	2	15.38	
	F3	1	7.69	
	F4	2	15.38	
	F5	6	46.15	
	Valor médio	78.66		
Mediana	20.00			
Comprimento (l) (m)	Continuidade muito baixa <1	0.00	0.00	
	Continuidade baixa 1-3	0.00	0.00	
	Continuidade média 3-10	13.00	100.00	
	Continuidade alta 10-20	0.00	0.00	
	Continuidade muito alta >20	0.00	0.00	
	Valor médio	6.68		
Mediana	6.50			
Curvatura C	C,1	7	53.85	
	C,2	2	15.38	
	C,3	4	30.77	
	C,4	0	0.00	
Rugosidade R	O,1	0	0.00	
	O,2	0	0.00	
	O,3	13	100.00	
	O,4	0	0.00	
	P,1	0	0.00	
	P,2	0	0.00	
Tipo de enchimento	Argiloso Duro	1	7.69	
	Argiloso Mole	0	0.00	
	Quartzo	1	7.69	
	Sem enchimento	11	84.62	
Presença de água	Seca	11	84.62	
	Húmida	2	15.38	
	Fluxo	0	0.00	
	Gotejante	0	0.00	
Resistência à compressão uniaxial (MPa)	S1	0	0.00	
	S2	2	100.00	
	S3	0	0.00	
	S4	0	0.00	
	S5	0	0.00	
	Valor médio	78.50		
Mediana	78.50			

Quadro 15. Síntese das características das descontinuidades nos Metassedimentos do Túnel Sul

Parâmetro (ISRM, 1981)	Tipo	n	%	Distribuição
Tipo de Descontinuidade	Diáclase	494	99.60	
	Falha	0	0.00	
	Filão	2	0.40	
Famílias Principais	N69°W;76°SW		496 Polos	
	N15°E;81°SE			
	N69°E;43°NW			
Grau de Alteração	W1	419	84.48	
	W2	63	12.70	
	W3	14	2.82	
	W4	0	0.00	
	W5	0	0.00	
Abertura (mm)	Fechada	268	54.03	
	Aberta	226	45.56	
	Muito Aberta	2	0.40	
	Valor médio	0.79		
	Mediana	0.50		
	Grau de fracturação (cm) (Fracture intercept)	F1	20	4.03
F2		265	53.43	
F3		186	37.50	
F4		25	5.04	
F5		0	0.00	
Valor médio		89.79		
Mediana	75.00			
Comprimento (l) (m)	Continuidade muito baixa <1	0.00	0.00	
	Continuidade baixa 1-3	0.00	0.00	
	Continuidade média 3-10	439.00	88.51	
	Continuidade alta 10-20	57.00	11.49	
	Continuidade muito alta >20	0.00	0.00	
	Valor médio	8.11		
Mediana	8.05			
Curvatura C	C,1	446	89.92	
	C,2	36	7.26	
	C,3	14	2.82	
	C,4	0	0.00	
Rugosidade R	O,1	7	1.41	
	O,2	269	54.23	
	O,3	209	42.14	
	O,4	0	0.00	
	P,2	8	1.61	
	P,3	3	0.60	
Tipo de enchimento	Argiloso Duro	10	2.02	
	Argiloso Mole	23	4.64	
	Quartzo	138	27.82	
	Sem enchimento	325	65.52	
Presença de água	Seca	391	78.83	
	Húmida	102	20.56	
	Fluxo	3	0.60	
	Gotejante	0	0.00	
Resistência à compressão uniaxial (MPa)	S1	0	0.00	
	S2	54	93.10	
	S3	4	6.90	
	S4	0	0.00	
	S5	0	0.00	
	Valor médio	78.50		
Mediana	78.50			

Quadro 16. Síntese das características das descontinuidades nos Quartzitos do Túnel Sul

Parâmetro (ISRM, 1981)	Tipo	n	%	Distribuição
Tipo de Descontinuidade	Diáclase	62	100.00	<p>Distribuição</p> <p>100% 0% 0.00% 0.00%</p> <p>Diáclase Falha Filão</p>
	Falha	0	0.00	
	Filão	0	0.00	
Famílias Principais	N10°W;85°NE	62 Polos		
	N76°W;74°SW			
	N78°W;61°NE			
Grau de Alteração	W1	62	100.00	<p>100.00%</p> <p>100% 50% 0%</p> <p>W1 W2 W3 W4 W5</p>
	W2	0	0.00	
	W3	0	0.00	
	W4	0	0.00	
	W5	0	0.00	
Abertura (mm)	Fechada	46	74.19	<p>100%</p> <p>100% 50% 0%</p> <p>Fechada Aberta Muito Aberta</p>
	Aberta	14	22.58	
	Muito Aberta	2	3.23	
	Valor médio	3.70		
	Mediana	0.10		
Grau de fracturação (cm) (Fracture intercept)	F1	18	29.03	<p>60%</p> <p>60% 40% 20% 0%</p> <p>F1 F2 F3 F4 F5</p>
	F2	34	54.84	
	F3	10	16.13	
	F4	0	0.00	
	F5	0	0.00	
	Valor médio	152.18		
Valor médio	135.00			
Comprimento (l) (m)	Continuidade muito baixa <1	0.00	0.00	<p>100%</p> <p>100% 80% 60% 40% 20% 0%</p> <p><1 1-3 3-10 10-20 >20</p>
	Continuidade baixa 1-3	0.00	0.00	
	Continuidade média 3-10	57.00	91.94	
	Continuidade alta 10-20	5.00	8.06	
	Continuidade muito alta >20	0.00	0.00	
	Valor médio	7.78		
	Mediana	7.60		
Curvatura C	C,1	53	85.48	<p>100%</p> <p>100% 0%</p> <p>C,1 C,2 C,3 C,4</p>
	C,2	8	12.90	
	C,3	1	1.61	
	C,4	0	0.00	
Rugosidade R	O,1	0	0.00	<p>100%</p> <p>100% 50% 0%</p> <p>O,1 O,2 O,3 O,4 P,1 P,2</p>
	O,2	2	3.23	
	O,3	59	95.16	
	O,4	0	0.00	
	P,1	1	1.61	
	P,2	0	0.00	
Tipo de enchimento	Argiloso Duro	1	1.61	<p>100%</p> <p>100% 50% 0%</p> <p>AD AM Qz SE</p>
	Argiloso Mole	0	0.00	
	Quartzo	20	32.26	
	Sem enchimento	41	66.13	
Presença de água	Seca	53	88.33	<p>100%</p> <p>100% 0%</p> <p>S H F G</p>
	Húmida	7	11.67	
	Fluxo	0	0.00	
	Gotejante	2	3.23	
Resistência à compressão uniaxial (MPa)	S1	0	0.00	<p>100.00%</p> <p>100% 80% 60% 40% 20% 0%</p> <p>S1 S2 S3 S4 S5</p>
	S2	10	100.00	
	S3	0	0.00	
	S4	0	0.00	
	S5	0	0.00	
	Valor médio	78.79		
Mediana	72.35			

3.4. Apresentação de resultados dos levantamentos geológico-geotécnicos

A cada levantamento geológico-geotécnico os avanços foram classificados segundo as três principais versões do índice GSI (GSI₉₈: Hoek et al., 1998; GSI₂₀₀₁: Marinos & Hoek, 2001; GSI₂₀₁₃: Hoek et al., 2013). Nos quadros 17 e 18 apresentam-se os valores obtidos para cada um dos túneis. Para as versões de 1998 e 2001 onde os autores recomendam o uso de um intervalo de valores em detrimento de um valor de GSI apresenta-se também o valor médio deste intervalo. Nos referidos quadros 17 e 18 apresentam-se alguns aspectos observados de cariz geológico-geotécnico que influenciam directamente a aplicação das versões GSI.

Quadro 17. Resultado da aplicação das três versões do GSI e aspectos geológicos-geotécnicos observados no túnel Poente Sul.

Pk inicial	Pk final	Litologia	Observações	Hoek 1998		Hoek 2001		Jc	Espaçamento médio(m)	Hoek 2013	
				Intervalo	Valor médio	Intervalo	Valor médio			RQDt (Priest, 1983)	GSI (c/ RQDt Priest, 1983)
15+729,00	15+733,00	Xisto Cinzento		62-67	65	52-57	54.5	21	0.79	64	63
15+733,00	15+737,00	Quartzito fino	Contacto Xisto/Quartzito por filão de quartzo	60-65	62.5	50-55	52.5	21	1.55	86	75
15+737,00	17+741,00	Quartzito fino		70-75	72.5	51-56	53.5	21	1.59	87	75
17+741,00	17+746,50	Quartzito fino		59-64	61.5	49-54	51.5	21	1.17	79	71
17+746,50	17+749,50	Quartzito fino		70-75	72.5	58-63	60.5	21	1.56	87	75
17+749,50	15+753,00	Quartzito fino		67-72	69.5	54-59	56.5	21	1.37	83	73
15+753,00	15+758,50	Metassedimentos	Contacto Quartzito/Metassedimentos por discordância com filão de quartzo	67-72	69.5	59-64	61.5	21	1.40	84	73
15+758,50	15+763,00	Metassedimentos		69-74	71.5	60-65	62.5	21	1.24	81	72
15+763,00	15+768,00	Metassedimentos		60-65	62.5	51-56	53.5	21	1.22	80	72
15+768,00	15+773,50	Metassedimentos		54-59	56.5	52-57	54.5	21	1.19	79	71
15+773,50	15+778,50	Metassedimentos		52-57	54.5	44-49	46.5	21	1.50	86	74
15+778,50	15+783,50	Metassedimentos		58-63	60.5	50-55	52.5	21	1.00	73	68
15+783,50	15+788,50	Metassedimentos		70-75	72.5	59-54	56.5	21	1.19	80	71
15+788,50	15+793,50	Metassedimentos		58-63	60.5	49-54	51.5	21	1.09	77	70
15+793,50	15+799,00	Metassedimentos	Faixas de maciço pouco a medianamente alterado a acompanhar descontinuidades com atitude N30eW,38eNE	50-55	52.5	40-45	42.5	9	0.84	67	47
15+799,00	15+803,50	Metassedimentos		49-54	51.5	40-45	42.5	9	0.81	65	46
15+803,50	15+808,00	Metassedimentos		56-61	58.5	47-52	49.5	14	0.61	51	46
15+808,00	15+813,00	Metassedimentos		57-62	59.5	48-53	50.5	18	0.92	71	62
15+813,00	15+817,50	Metassedimentos		57-62	59.5	48-53	50.5	18	0.74	61	58
15+817,50	15+821,50	Metassedimentos		49-54	51.5	49-54	51.5	18	1.09	77	65
15+821,50	15+826,00	Metassedimentos		45-50	47.5	47-53	50	18	0.84	67	60
15+826,00	15+830,50	Metassedimentos	Filão de quartzo	55-60	57.5	50-55	52.5	18	0.99	73	64
15+830,50	15+835,00	Metassedimentos		60-65	62.5	51-56	53.5	18	0.86	68	61
15+835,00	15+838,50	Metassedimentos		61-66	63.5	51-56	53.5	19	0.81	65	61
15+838,50	15+842,50	Metassedimentos		58-63	60.5	50-55	52.5	21	0.58	48	56
15+842,50	15+846,50	Metassedimentos		45-50	47.5	50-55	52.5	20	0.76	62	61
15+846,50	15+850,50	Metassedimentos		56-61	58.5	52-57	54.5	20	0.80	65	62
15+850,50	15+855,00	Metassedimentos		62-67	64.5	55-60	57.5	20	0.64	54	57
15+855,00	15+859,00	Metassedimentos	Massa de quartzo e filões de quartzo perpendiculares ao eixo	62-67	64.5	55-60	57.5	20	0.65	55	57
15+859,00	15+864,00	Metassedimentos	Fracturação intensa segundo N50eW/74eSW acompanhadas por faixa de maciço medianamente alterado	51-56	53.5	42-47	44.5	18	0.80	65	59
15+864,00	15+867,50	Metassedimentos		56-61	58.5	49-54	51.5	18	0.82	66	60
15+867,50	15+871,00	Metassedimentos		70-75	72.5	55-60	57.5	18	0.87	68	61
15+871,00	15+876,00	Metassedimentos		70-75	72.5	55-60	57.5	19	0.66	55	56
15+876,00	15+879,50	Metassedimentos		66-71	68.5	53-58	55.5	19	0.65	55	56
15+879,50	15+882,00	Metassedimentos		71-76	73.5	61-66	63.5	19	0.97	72	65
15+882,00	15+887,00	Metassedimentos		53-58	55.5	45-50	47.5	19	0.53	44	51

Quadro 18. Resultado da aplicação das três versões do GSI e aspectos geológicos-geotécnicos observados no túnel Poente Norte

Pk inicial	Pk final	Litologia	Observações	Hoek 1998		Hoek 2001		Hoek 2013			
				Intervalo	Valor médio	Intervalo	Valor médio	Jc	Espaçamento médio(m) (Fracture intercept)	RQDt (Priest, 1983)	GSI (c/ RQDt: Priest, 1983)
15+580,00	15+585,00	Quartzito fino		60-65	63	53-57	55	21	1.25	81	72
15+585,00	15+590,00	Quartzito fino		66-71	69	60-65	62.5	21	2.00	81	77
15+590,00	15+594,50	Quartzito fino		72-77	75	61-66	63.5	21	1.75	89	76
15+594,50	15+598,50	Quartzito fino		61-66	64	50-55	52.5	21	1.41	84	74
15+598,50	15+602,50	Quartzito fino		62-67	65	51-56	53.5	21	1.56	86	75
15+602,50	15+607,00	Quartzito fino		56-61	59	41-46	43.5	20	1.51	86	73
15+607,00	15+611,50	Quartzito fino/Xisto		49-51	50	35-40	37.5	11	1.21	80	56
15+611,50	15+616,50	Quartzito fino/Xisto		49-51	50	35-40	37.5	14	1.19	80	61
15+616,50	15+619,50	Quartzito fino/Xisto		51-56	54	46-52	49	16	1.17	79	63
15+619,50	15+623,50	Quartzito fino/Xisto		46-51	49	41-46	43.5	16	1.10	77	62
15+623,50	15+629,00	Quartzito fino/Xisto		45-50	48	35-40	37.5	14	1.09	77	59
15+629,00	15+633,00	Quartzito fino/Xisto		53-58	56	40-45	42.5	16	1.03	75	61
15+633,00	15+637,50	Xisto	Filão de quartzito segundo N40ºE;80ºNW com 0,5m de espessura	53-58	56	40-45	42.5	16	0.76	62	55
15+637,50	15+642,00	Xisto		53-58	56	40-45	42.5	16	0.99	73	61
15+642,00	15+646,00	Xisto		53-58	56	40-45	42.5	18	0.85	67	61
15+646,00	15+650,50	Xisto		44-49	47	40-45	42.5	16	0.77	63	55
15+650,50	15+654,50	Xisto	Faixa de maciço alterado segundo N50ºW, associado a	44-49	47	40-45	42.5	16	0.73	63	55
15+654,50	15+659,00	Xisto	descontinuidades com a mesma	44-49	47	40-45	42.5	14	0.84	66	54
15+659,00	15+662,50	Xisto	atitude	46-51	49	42-47	44.5	14	0.58	49	45
15+662,50	15+664,00	Xisto		46-51	49	42-47	44.5	14	0.58	49	45
15+664,00	15+668,00	Xisto		54-59	57	45-50	47.5	16	0.99	73	61
15+668,00	15+671,50	Xisto		53-58	56	45-50	47.5	16	0.88	69	58
15+671,50	15+675,50	Xisto		57-62	60	47-52	49.5	16	0.75	62	55
15+675,50	15+680,00	Xisto		60-65	63	51-56	53.5	16	0.86	67	58
15+680,00	15+682,00	Xisto		60-65	63	53-58	55.5	18	0.76	62	58
15+682,00	15+686,00	Xisto		62-67	65	57-62	59.5	20	0.95	72	66
15+686,00	15+690,00	Xisto		60-65	63	54-59	56.5	21	0.91	70	66
15+690,00	15+694,50	Xisto		56-61	59	47-52	49.5	20	0.81	65	63
15+694,50	15+698,50	Xisto		59-64	62	50-55	52.5	21	0.83	66	65
15+698,50	15+702,50	Xisto		58-63	61	50-55	52.5	21	0.67	56	60
15+702,50	15+707,00	Xisto		15+702,50	59	46-51	48.5	21	0.70	58	61
15+707,00	15+710,50	Xisto		52-57	55	43-48	45.5	21	0.66	55	59
15+710,50	15+714,50	Xisto/Metassedimentos	Contacto por discordância segundo N25ºE	52-57	55	43-48	45.5	20	0.77	63	61
15+714,50	15+719,00	Metassedimentos		69-74	72	54-59	56.5	20	0.74	61	60
15+719,00	15+723,00	Metassedimentos		62-67	65	49-54	51.5	21	0.86	68	65
15+723,00	15+728,00	Metassedimentos	Intrusão de Xisto cinzento no lado esquerdo	54-59	57	43-48	45.5	21	0.69	57	60
15+728,00	15+731,50	Metassedimentos		51-56	54	40-45	42.5	16	1.36	83	66
15+731,50	15+736,00	Metassedimentos		46-51	49	37-42	39.5	11	0.89	69	51

3.5. Zonamento Geológico-Estrutural, Geotécnico e Geomecânico

Com os dados recolhidos nos levantamentos de frente de escavação efectuados, procurou-se definir três tipos de zonamento: i) Zonamento geológico-estrutural, orientado para a geologia de engenharia; ii) Zonamento geotécnico, baseada na BGD da ISRM (1981); iii) Zonamento geomecânico, em termos de GSI + RMR.

O quadro 19 apresenta uma síntese dos parâmetros orientadores para a definição dos zonamentos descritos.

Quadro 19. Parâmetros para definição de zonamentos (parâmetros geológico-geotécnicos segundo ISRM, 1981) de maciços rochosos fracturados.

		Parâmetros geológico-geotécnicos	
Zonamento Geológico-Estrutural (com enfoque para a geologia de engenharia)	Contactos ou limites geológicos	Litológico	
		Tectónico	Falha
			Zonas de Cisalhamento
	Corredores de deformação/tectónicos	Filão	
		Densidade das Redes de Fracturação	
	Filões com expressividade cartográfica	Alinhamentos geoestruturais/tectónicos	
Filão – Falha			
Zonamento Geotécnico (baseado na ISRM, 1981; CFCFF, 1996)	Pretende a definição de grupos geotécnicos e dentro destas zonas e sub-zonas	Heterogeneidade do maciço	Litológica
		Estrutural	
		Grau de alteração (W)	
		Grau de fracturação (F)	
		Grau de resistência (S)	
Condições geotécnicas das discontinuidades [critérios BGD da ISRM, 1981; CFCFF, 1996] – (rugosidade, abertura, preenchimento, terminação, percolação de água, etc.)			
Zonamento Geomecânico	<p>Baseado, especialmente:</p> <p>I - nas versões de GSI:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hoek et al., 1998 • Marinos & Hoek, 2001 • Hoek et al., 2013 <p>II – na versão RMR:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bieniawski, 1989 		

3.5.1. Zonamento Geológico-Estrutural

Com base nos levantamentos geológico-geotécnicos realizados em ambos os túneis foi possível elaborar, em paralelo, para cada um o respectivo zonamento geológico-estrutural, orientado para a geologia de engenharia. Como se refere no ponto 3.3.1 foram observadas três litologias diferentes, todas de origem metamórfica, sendo os contactos entre as mesmas materializados por discordâncias simples, e no caso da passagem de quartzitos para xistos no túnel Norte observou-se o contacto entre litologias por meio de uma estrutura tectónica.

O zonamento geológico-estrutural foi então definido com base na heterogeneidade litológica uma vez que as unidades litológicas não apresentam variações ou fenómenos estruturais de relevo que possam servir para individualizar compartimentos tectónicos. Assim, definiu-se para cada um dos túneis o zonamento geológico-estrutural apresentado nas figuras 42 e 44.

3.5.2. Zonamento Geotécnico

Para a definição do zonamento geotécnico em cada um dos túneis foi considerado o zonamento geológico-estrutural em conjugação com 3 parâmetros fundamentais, Grau de alteração (W), Grau de fracturação (F) e Grau de resistência (S). Procurou-se dentro de cada unidade litológica identificar variações dos parâmetros geomecânicos de forma a definir zonas com diferentes características.

Analisando a variação do grau de alteração do maciço definiu-se um primeiro zonamento onde foi possível identificar em cada um dos túneis as zonas com diferente grau de alteração e de fracturação. Delimitadas estas zonas procurou-se dentro das mesmas individualizar as variações de resistência do maciço, assim conjugado os 3 parâmetros principais e integrando a informação geológica-estrutural foi possível para cada um dos túneis definir o zonamento geotécnico que se apresenta nas figuras 42 e 44.

Túnel Norte

No túnel Norte foram definidas 4 zonas geotécnicas de acordo com a diferenciação dos parâmetros anteriormente descritos, 2 zonas onde o maciço observado apresentava parâmetros de qualidade alta (ZG Ia e ZG Ib), diferenciando-se entre elas o grau de resistência e uma ligeira diferença na intensidade de fracturação, maior na zona ZG Ib, uma zona (ZG II) onde o maciço apresentava condições geotécnicas relativamente mais fracas apresentando-se medianamente alterado com fracturas medianamente afastadas e com resistência do maciço média. Por último definiu-se a zona geotécnica ZG III na zona de falha no contacto entre os Quartzitos e os Xistos

onde o maciço se apresentava alterado e com fracturas próximas e com resistência a apresentar os valores mais baixos do conjunto das superfícies cartografadas nos dois túneis.

Apresentam-se assim as 4 zonas geotécnicas definidas, apresentando-se a planta do zonamento na figura 43:

- ZG Ia – Maciço constituído por Quartzito fino com intercalação de filitos, no geral são (W_1), com fracturas afastadas (F_2), resistência à compressão uniaxial elevada [85 a 105 MPa]
- ZG Ib – Maciço constituído maioritariamente por Xisto Cinzento e por Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, são (W_1), com fracturas afastadas (F_2), resistência à compressão uniaxial elevada [65 a 85 MPa]
- ZG II – Maciço constituído maioritariamente por Xisto Cinzento e por Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, medianamente a pouco alterado (W_3 a W_2), com fracturas medianamente afastadas (F_3), resistência á compressão uniaxial média [45 a 60 MPa]
- ZG III – Maciço constituído por Xisto Cinzento e Quartzito fino com intercalação de filitos, alterado (W_4) com fracturas medianamente afastadas (F_3), resistência à compressão uniaxial média [35 a 55 MPa]

Procurou-se posteriormente pormenorizar o zonamento obtido e foi possível obter uma divisão em 7 subzonas geotécnicas distintas (cf. figura 43), 2 nos quartzitos (ZGQ1 e ZGQ2), 1 na zona de contacto por falha (e claramente condicionado pela mesma) quartzitos/xistos (ZGQX), 3 na zona de Xisto (ZGX1, ZGX2 e ZGX3) sendo que a última zona engloba parte dos metassedimentos, e uma zona nos metassedimentos (ZGM1).

O quadro 20 apresenta os parâmetros geotécnicos considerados para a definição do zonamento (ISRM, 1981).

Quadro 20. Valores dos parâmetros geotécnicos nas zonas geotécnicas do Túnel Norte.

		Intervalo	Valor Médio	Mediana		Intervalo	Valor Médio	Mediana		Intervalo	Valor Médio	Mediana
		ZGQ1				ZGQ2				ZGQX		
Litologia		Qtz				Qtz				Qtz/Xt		
Grau de Alteração		W1				W1				W4		
Grau de Resistência	S2	85 - 105 MPa	86.82 MPa	87.05 MPa	S2	65 - 75 MPa	63.80 MPa	68.9 MPa	S3	35 - 55 MPa	45.50 MPa	38.00 MPa
Grau de Fracturação	F2	110 - 180 cm	126.22 cm	120.00 cm	F2	85 - 120 cm	95.67 cm	110.00 cm	F3	20 - 50 cm	44.5 cm	30.00 cm
		ZGX1				ZGX2				ZGX3		
Litologia		Xt				Xt				Xt/Mts		
Grau de Alteração		W1				W3 a W2				W1		
Grau de Resistência	S2	65 - 75 MPa	67.03 MPa	65.80 MPa	S3	45 - 60 MPa	56.09 MPa	59.0 MPa	S2	65 - 85 MPa	72.78 MPa	73.50 MPa
Grau de Fracturação	F2	80 - 110 cm	107.97 cm	105.00 cm	F3	20 - 55 cm	42.65 cm	50.00 cm	F2	75 - 110 cm	82.88 cm	100.00 cm
		ZGM										
Litologia		Mts/Xt										
Grau de Alteração		W2 a W3										
Grau de Resistência	S3	40 - 55 MPa	48.35 MPa	48.35 MPa								
Grau de Fracturação	F3	20 - 45 cm	32.06 cm	40.00 cm								

As subzonas ZGQ1 e ZGQ2 apresentavam o mesmo grau de alteração e de fracturação (W_1, F_2), embora os valores de espaçamento de fracturas fossem diferentes, o mesmo se verifica relativamente à resistência, apesar de as mesmas apresentarem o mesmo grau de resistência (S_2) os valores obtidos evidenciam a existência de zonas diferentes. Assim as mesmas foram definidas sendo que a ZGQ1 apresenta valores mais elevados no que ao grau de fracturação e resistência diz respeito.

A subzona ZGQX diz respeito à zona de transição entre os quartzitos e o xisto sendo o contacto feito por uma falha, nesta zona observou-se maciço muito influenciado pela referida estrutura apresentando-se alterado e com fracturas medianamente afastadas (W_4, F_3) e com grau de resistência S_3 .

Nos xistos foram definidas 3 subzonas geotécnicas (como já referido a última zona engloba parte dos metassedimentos), as zonas ZGX1 e ZGX3 apresentavam características semelhantes, maciço são e pouco fracturado (W_1, F_2) com valores de espaçamento de fracturas próximos, bem como de resistência (S_2). Verifica-se ainda que esta zona pode ser relacionada com a zona ZGQ2 no que às condições geotécnicas diz respeito. A zona ZGX2 apresentava maciço pouco a medianamente alterado (W_2 a W_3) com descontinuidades medianamente afastadas com uma orientação preferencial segundo N120ºE, apresentando uma resistência inferior (S_3) às zonas ZGX1 e ZGX3.

Foi definida uma subzona geotécnica nos metassedimentos onde o maciço se apresentava maciço pouco a medianamente alterado (W_2 a W_3) com descontinuidades medianamente afastadas e com grau de resistência S_3 .

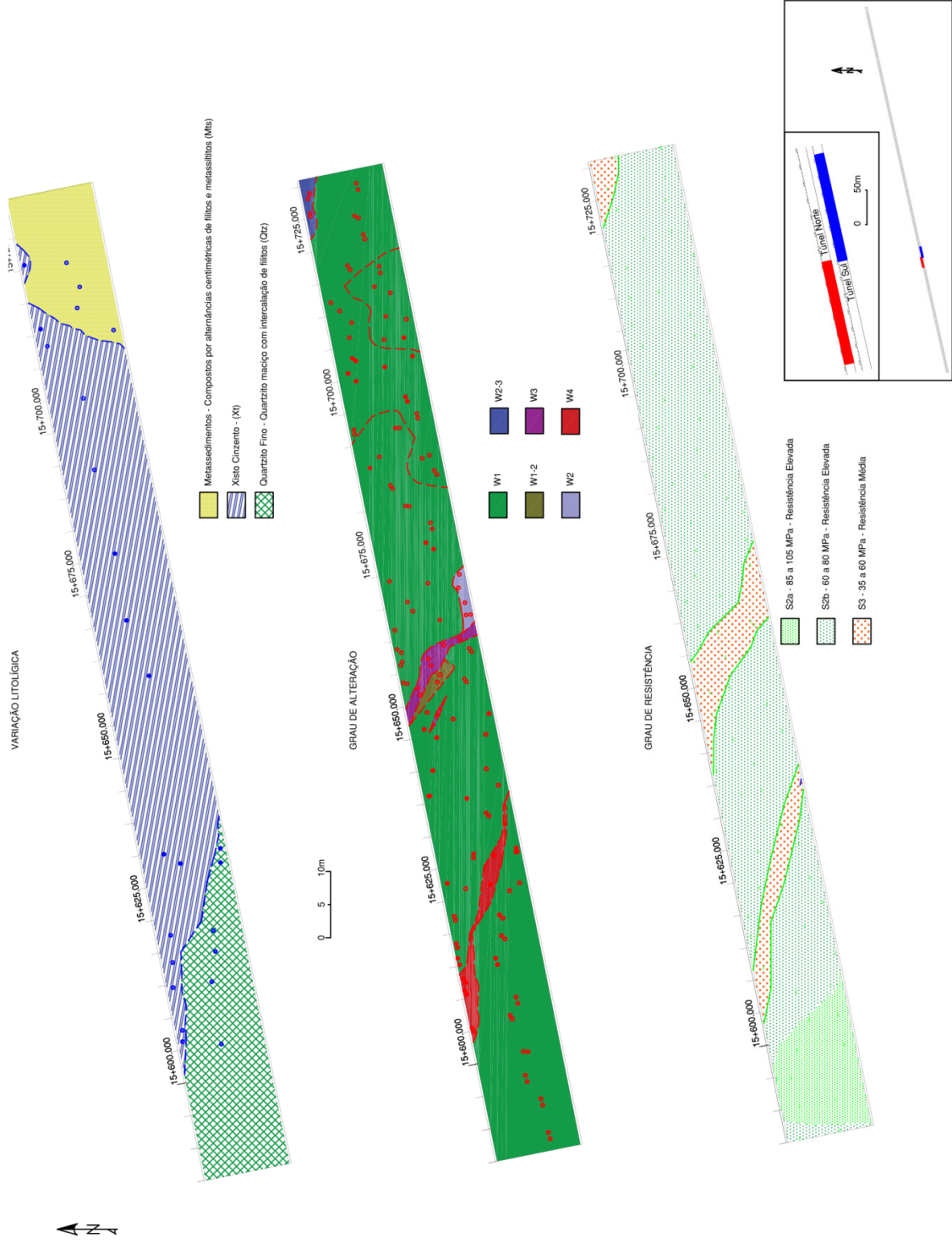


Figura 42. Zonamento da heterogeneidade litológica, Zonamento de grau de alteração e zonamento de grau de resistência para o Túnel Norte.

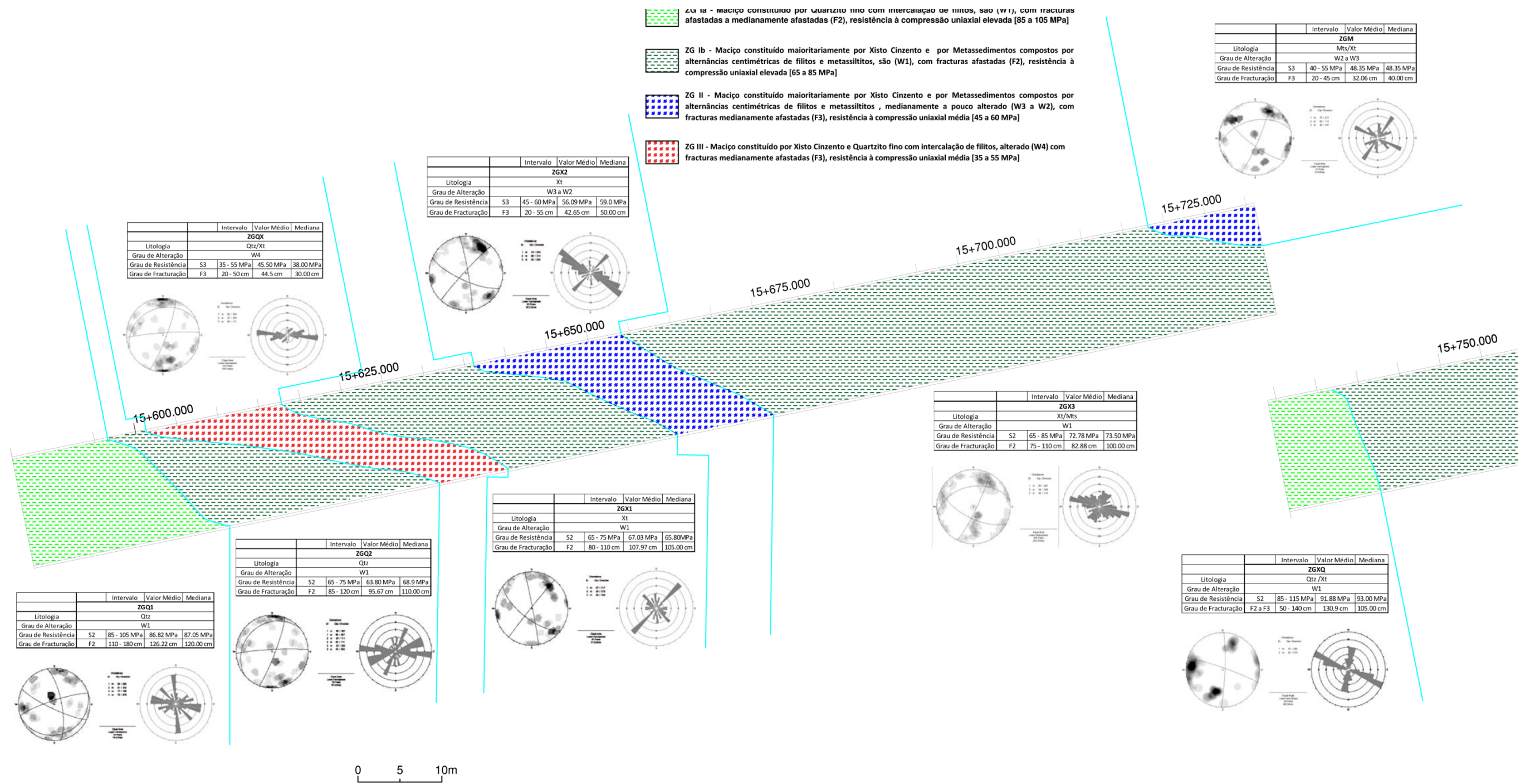
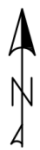


Figura 43. Zonamento Geotécnico com subzonas para o Túnel Norte.

Túnel Sul

No túnel Sul foram definidas 3 zonas geotécnicas de acordo com a diferenciação dos parâmetros anteriormente descritos, duas (2) zonas onde o maciço observado apresentava parâmetros de qualidade alta (ZG Ia e ZG Ib), diferenciando-se entre elas o grau de resistência do maciço bem como ligeiras diferenças nos graus de alteração e fracturação, e uma zona (ZGII) onde o maciço apresentava condições geotécnicas relativamente mais fracas com grau de alteração ligeiramente mais elevado, maior intensidade de fracturação e resistência do maciço mais baixa. Apresentam-se assim as 3 zonas geotécnicas definidas, apresentando-se a planta do zonamento na figura 45:

- ZG Ia – Maciço constituído por Quartzito fino com intercalação de filitos, são (W_1), com fracturas afastadas a medianamente afastadas (F_2 a F_3), resistência à compressão uniaxial elevada [85 a 115 MPa]
- ZG Ib – Maciço constituído por Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, são a pouco alterado (W_1 a W_2), com fracturas afastadas a medianamente afastadas (F_2 a F_3), resistência à compressão uniaxial elevada [60 a 85 MPa]
- ZG II – Maciço constituído por Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, pouco a medianamente alterado (W_2 a W_3), com fracturas afastadas a medianamente afastadas (F_2 a F_3) e medianamente afastadas a próximas (F_3 a F_4), resistência à compressão uniaxial média [35 a 55 MPa]

Procurou-se posteriormente pormenorizar o zonamento obtido e foi possível obter uma divisão em 8 zonas subzonas geotécnicas distintas (cf. figura 45), 1 zona que engloba o troço em xisto e parte dos quartzitos (ZGXQ), 1 zona de grande extensão onde se observou o contacto entre quartzitos e metassedimentos (ZGQM) e 6 zonas nos metassedimentos (ZGM1 a ZGM6).

O quadro 21 apresenta os parâmetros geotécnicos considerados para a definição do zonamento (ISRM, 1981).

Quadro 21. Valores dos parâmetros geotécnicos nas zonas geotécnicas do Túnel Sul.

		Intervalo	Valor Médio	Mediana		Intervalo	Valor Médio	Mediana		Intervalo	Valor Médio	Mediana	
		ZGXQ				ZGQM							
Litologia		Qtz /Xt				Mts/Xt							
Grau de Alteração		W1				W1							
Grau de Resistência	S2	85 - 115 MPa	91.88 MPa	93.00 MPa	S2	60 - 85 MPa	66.33 MPa	67.20 MPa					
Grau de Fracturação	F2 a F3	50 - 140 cm	130.9 cm	105.00 cm	F2 a F3	90 - 140 cm	126.58 cm	110.00 cm					
		ZGM1				ZGM2				ZGM3			
Litologia		Mts				Mts				Mts			
Grau de Alteração		W2 a W3				W1 a W2				W1 a W2			
Grau de Resistência	S3	45 - 55 MPa	50.53 MPa	49.2 MPa	S2	60 - 70 MPa	65.34 MPa	65.95 MPa	S3	55 - 60 MPa	58.55 MPa	58.55 MPa	
Grau de Fracturação	F3	35 - 55 cm	45.00 cm	47.50 cm	F2 a F3	45 - 85 cm	77.74 cm	85.00 cm	F2 a F3	45 - 85 cm	72.42cm	80.00 cm	
		ZGM4				ZGM5				ZGM6			
Litologia		Mts				Mts				Mts			
Grau de Alteração		W1 a W2				W1 a W2				W1 a W2			
Grau de Resistência	S2	60 - 80 MPa	68.47 MPa	68.30 MPa	S3	45 - 50 MPa	48.80 MPa	48.80 MPa	S2	60 - 80 MPa	73.01 MPa	75.05 MPa	
Grau de Fracturação	F2	80 - 120 cm	80.3cm	90.00 cm	F3 a F4	10 - 50 cm	31.3cm	40.00 cm	F2	70 - 120 cm	72.58cm	80.00 cm	

A subzona ZGXQ engloba a transição entre xistos e quartzitos (como já referido este contacto é feito por discordância simples) apresentando-se o maciço são e com descontinuidades afastadas a medianamente afastadas (W_1 , F_2 a F_3) apresentando grau de resistência S_2 com valores mais elevados do que em qualquer outra zona.

A subzona ZGQM engloba também um contacto entre litologias, também por discordância, entre quartzitos e metassedimentos, Esta zona apresenta à semelhança da anterior são com descontinuidades afastadas a medianamente afastadas (W_1 , F_2 a F_3) apresentando valores de resistência mais baixos embora apresente também grau de resistência S_2 .

Foram definidas 6 subzonas nos metassedimentos, embora se encontrem semelhanças entre 3 delas, as subzonas ZGM2, ZGM4 e ZGM6 apresentaram maciço são a pouco alterado (W_1 a W_2) com descontinuidades afastadas (a zona ZGM2 apresentou maior intensidade de fracturação) e grau de resistência S_2 com valores próximos nas 3 zonas.

A subzona ZGM1 apresentava maciço pouco a medianamente alterado (W_2 a W_3) com fracturas medianamente afastadas (F_3) e grau de resistência S_3 , tendo-se observado faixas de maciço medianamente alterado, com intensa fracturação e com evidente oxidação segundo N28°W a acompanhar descontinuidades com a mesma orientação.

A subzona ZGM3 apresentou maciço são a pouco alterado (W_1 a W_2) com descontinuidades afastadas a medianamente afastadas (F_2 a F_3) com grau de resistência S_3 , apresentando características próximas às da zona ZGM1, observaram-se valores mais altos de espaçamento médio das descontinuidades e de resistência.

A subzona ZGM5 foi a que piores condições geotécnicas apresentou apesar de se ter observado maciço são a pouco alterado (W_1 a W_2), contudo com intensa fracturação (F_3 a F_4) e baixo grau de resistência (S_3).

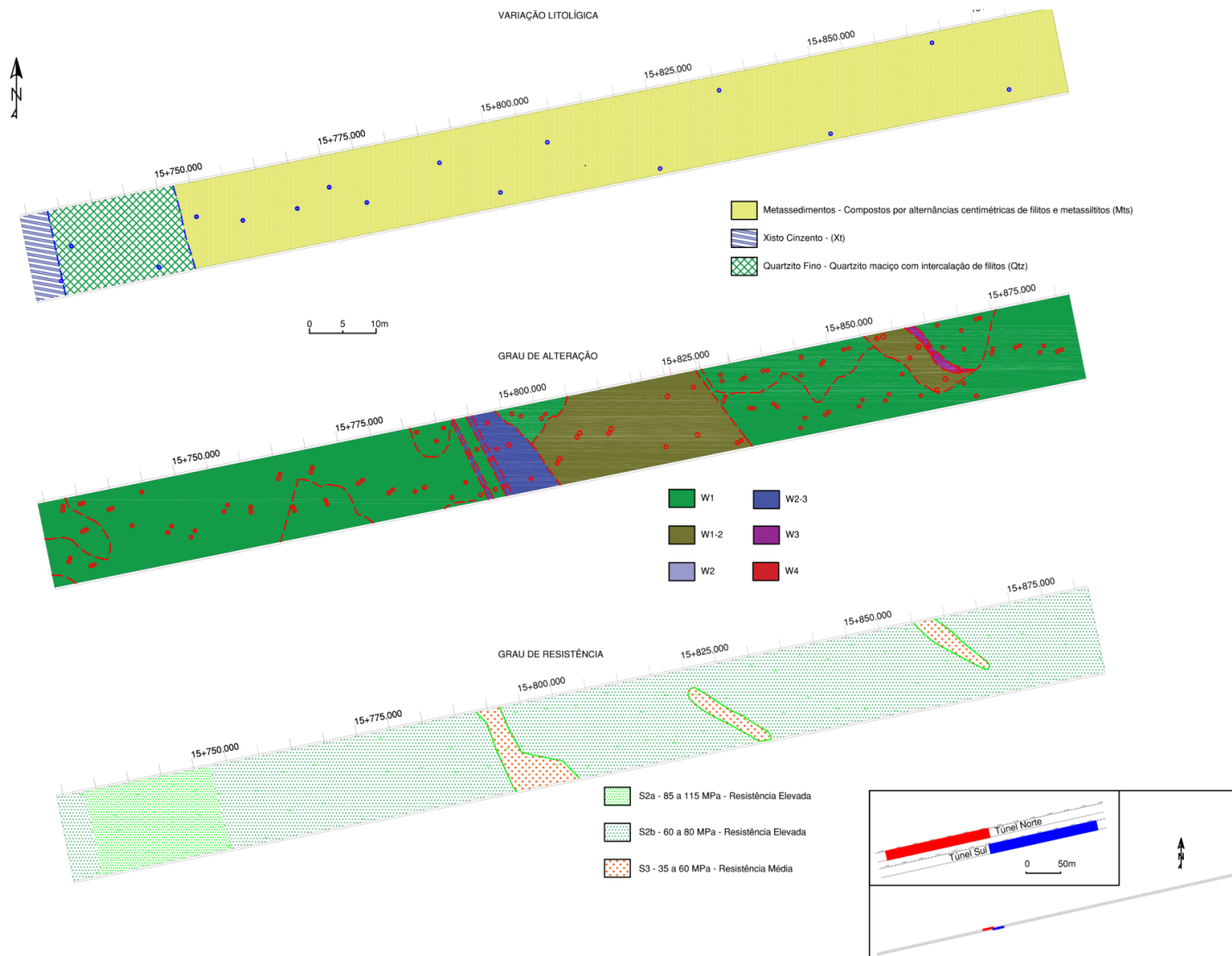


Figura 44. Zonamento baseado na heterogeneidade litológica, Zonamento de grau de alteração e zonamento de grau de resistência para o Túnel Sul.

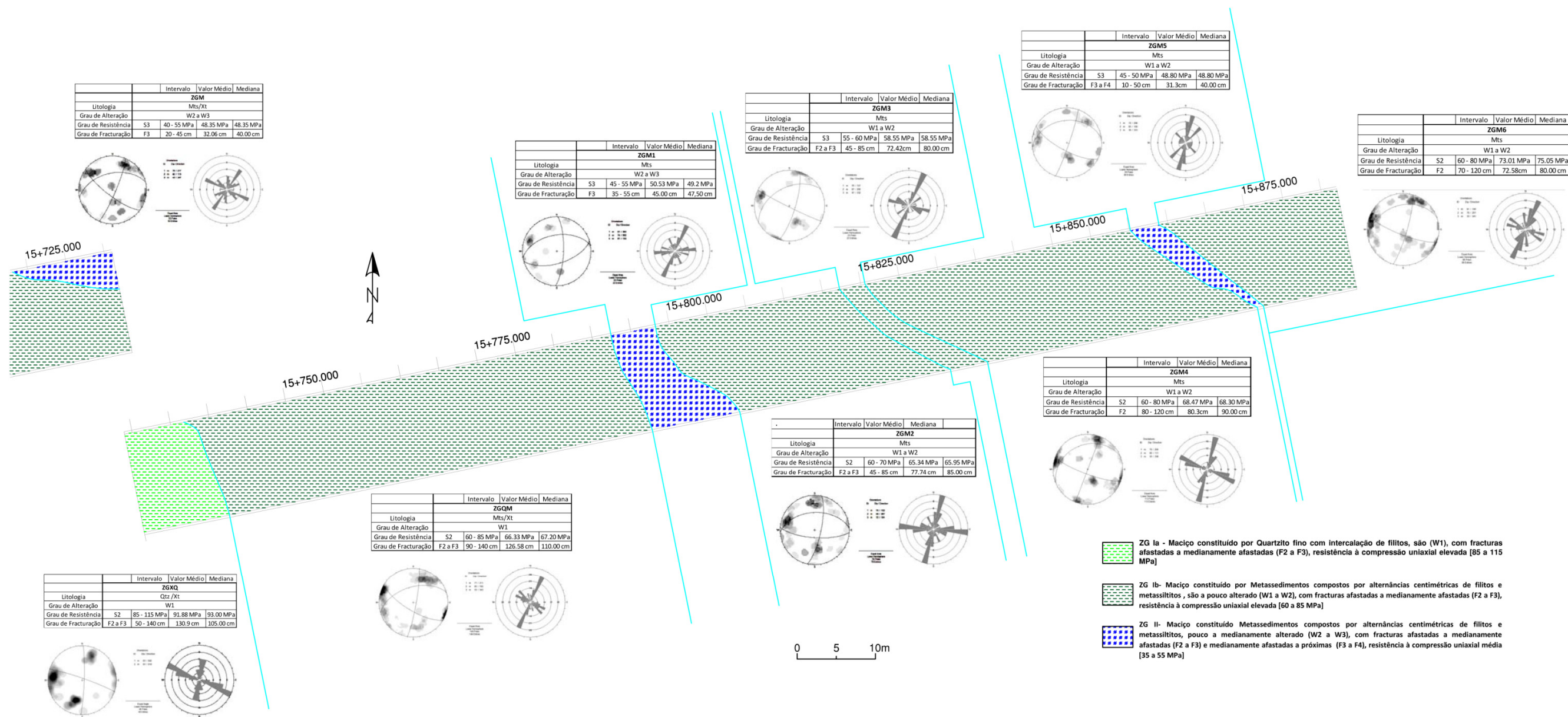


Figura 45. Zonamento Geotécnico com subzonas para o Túnel Sul.

3.5.3. Zonamento Geomecânico

Como referido no ponto 3.4, a cada avanço escavado foi efectuado o levantamento geológico-geotécnico do avanço e com os dados recolhidos foram determinados os valores do “Geological Strength Index” para as 3 principais versões (GSI98: Hoek et al., 1998; GSI2001: Marinos & Hoek, 2001; GSI2013: Hoek et al., 2013), bem como o valor de RMR (RMR89: Bieniawski, 1989) que no âmbito da empreitada é o principal parâmetro geomecânico definidor do suporte a aplicar (cf. quadro 8).

Assim é possível fazer uma comparação dos valores obtidos para cada uma das versões do GSI aplicadas procurando encontrar as principais diferenças entre elas. Desde logo o método de avaliação entre as versões de 1998 e 2001 (GSI98: Hoek et al., 1998; GSI2001: Marinos & Hoek, 2001) é puramente observacional, são avaliadas as condições geotécnicas do maciço escavado quanto à sua compartimentação estrutural e às condições geológico-geotécnicas das suas descontinuidades, nomeadamente, o grau de alteração e a rugosidade, o que contrasta com a versão de 2013 (GSI2013: Hoek et al., 2013) onde são usados os valores atribuídos aos parâmetros “Joint Condition” (J_{Cond89} ; Bieniawski, 1989) e RQD (Deere, 1963; Deere et al., 1967)). O resultado obtido da aplicação de cada versão do GSI é também um factor de diferenciação, até à apresentação da versão de 2013, os autores Hoek et al. (2013) recomendaram a atribuição de um intervalo de valores em detrimento de um valor exacto, salvaguardando assim todas as variáveis decorrentes da aplicação da classificação por observação do maciço, na versão apresentada em 2013 (GSI2013: Hoek et al., 2013) é apresentada, tal como referido, a expressão ($GSI = 1.5 J_{\text{Cond89}} + RQD/2$) que permite a obtenção de um valor de GSI exacto. Refere-se ainda a grande diferença entre as versões de 2001 (GSI2001: Marinos & Hoek, 2001) e 2013 (GSI2013: Hoek et al., 2013) sendo que a apresentada em 2001 tem o seu foco de aplicação direccionado para rochas do tipo “*Flysch*”.

Hoek et al. (1998) vs Hoek et al. (2013)

Como já exposto, a cada avanço escavado foi efectuada a classificação para as várias versões do GSI, comparando as versões de 1998 e 2013 (GSI98: Hoek et al., 1998; GSI2013: Hoek et al., 2013) resultam as diferenças espelhadas nos quadros 22 e 23.

Quadro 22. Comparação das classificações Hoek et al. (1998) vs Hoek et al. (2013) no túnel Ponte Sul.

Frente	Pk inicial	Pk final	Litologia	Observações	Hoek 1998	Hoek 2013	Diferença
					Valor médio	GSI (c/ RQDt Priest, 1983)	
Poente Sul	15+729,00	15+733,00	Xisto Cinzento		65	63	-1.5
Poente Sul	15+733,00	15+737,00	Quartzito fino	Contacto Xisto/Quartzito por filão de quartzo	62.5	75	11.5
Poente Sul	15+737,00	17+741,00	Quartzito fino		72.5	75	1.5
Poente Sul	17+741,00	17+746,50	Quartzito fino		61.5	71	8.5
Poente Sul	17+746,50	17+749,50	Quartzito fino		72.5	75	1.5
Poente Sul	17+749,50	15+753,00	Quartzito fino		69.5	73	3.5
Poente Sul	15+753,00	15+758,50	Metassedimentos	Contacto Quartzito/Metassedimentos por discordância com filão de quartzo	69.5	73	3.5
Poente Sul	15+758,50	15+763,00	Metassedimentos		71.5	72	-0.5
Poente Sul	15+763,00	15+768,00	Metassedimentos		62.5	72	8.5
Poente Sul	15+768,00	15+773,50	Metassedimentos		56.5	71	14.5
Poente Sul	15+773,50	15+778,50	Metassedimentos		54.5	74	19.5
Poente Sul	15+778,50	15+783,50	Metassedimentos		60.5	68	7.5
Poente Sul	15+783,50	15+788,50	Metassedimentos		72.5	71	-1.5
Poente Sul	15+788,50	15+793,50	Metassedimentos		60.5	70	8.5
Poente Sul	15+793,50	15+799,00	Metassedimentos	Faixas de maciço pouco a medianamente alterado a acompanhar descontinuidades com atitude N30°W;38°NE	52.5	47	-6.5
Poente Sul	15+799,00	15+803,50	Metassedimentos		51.5	46	-5.5
Poente Sul	15+803,50	15+808,00	Metassedimentos		58.5	46	-12.5
Poente Sul	15+808,00	15+813,00	Metassedimentos		59.5	62	2.5
Poente Sul	15+813,00	15+817,50	Metassedimentos		59.5	58	-2.5
Poente Sul	15+817,50	15+821,50	Metassedimentos		51.5	65	13.5
Poente Sul	15+821,50	15+826,00	Metassedimentos		47.5	60	12.5
Poente Sul	15+826,00	15+830,50	Metassedimentos	Filão de quartzo	57.5	64	5.5
Poente Sul	15+830,50	15+835,00	Metassedimentos		62.5	61	-2.5
Poente Sul	15+835,00	15+838,50	Metassedimentos		63.5	61	-3.5
Poente Sul	15+838,50	15+842,50	Metassedimentos		60.5	56	-5.5
Poente Sul	15+842,50	15+846,50	Metassedimentos		47.5	61	13.5
Poente Sul	15+846,50	15+850,50	Metassedimentos		58.5	62	3.5
Poente Sul	15+850,50	15+855,00	Metassedimentos		64.5	57	-7.5
Poente Sul	15+855,00	15+859,00	Metassedimentos	Massa de quartzo e filões de quartzo perpendiculares ao eixo	64.5	57	-7.5
Poente Sul	15+859,00	15+864,00	Metassedimentos	Fracturação intensa segundo N50°W;74°SW acompanhadas por faixa de maciço medianamente alterado	53.5	59	5.5
Poente Sul	15+864,00	15+867,50	Metassedimentos		58.5	60	0.5
Poente Sul	15+867,50	15+871,00	Metassedimentos		72.5	61	-12.5
Poente Sul	15+871,00	15+876,00	Metassedimentos		72.5	56	-16.5
Poente Sul	15+876,00	15+879,50	Metassedimentos		68.5	56	-13.5
Poente Sul	15+879,50	15+882,00	Metassedimentos		73.5	65	-9.5
Poente Sul	15+882,00	15+887,00	Metassedimentos		55.5	51	-5.5

Quadro 23. Comparação das classificações Hoek et al. (1998) vs Hoek et al. (2013) no túnel Ponte Norte.

Frente	Pk inicial	Pk final	Litologia	Observações	Hoek 1998	Hoek 2013	Diferença
					Valor médio	GSI (c/ RQDt Priest, 1983)	
Poente Norte	15+580,00	15+585,00	Quartzito fino		63	72	9.5
Poente Norte	15+585,00	15+590,00	Quartzito fino		68.5	77	8.5
Poente Norte	15+590,00	15+594,50	Quartzito fino		74.5	76	1.5
Poente Norte	15+594,50	15+598,50	Quartzito fino		63.5	74	10.5
Poente Norte	15+598,50	15+602,50	Quartzito fino		64.5	75	10.5
Poente Norte	15+602,50	15+607,00	Quartzito fino		58.5	72	13.5
Poente Norte	15+607,00	15+611,50	Quartzito fino/Xisto	Contacto por falha com atitude E-W	50	56	6.0
Poente Norte	15+611,50	15+616,50	Quartzito fino/Xisto		50	61	11.0
Poente Norte	15+616,50	15+619,50	Quartzito fino/Xisto		53.5	63	9.5
Poente Norte	15+619,50	15+623,50	Quartzito fino/Xisto		48.5	62	13.5
Poente Norte	15+623,50	15+629,00	Quartzito fino/Xisto		47.5	59	11.5
Poente Norte	15+629,00	15+633,00	Quartzito fino/Xisto		55.5	61	5.5
Poente Norte	15+633,00	15+637,50	Xisto		Filão de quartzo segundo N40°E;80°NW com 0,5m de espessura	55.5	55
Poente Norte	15+637,50	15+642,00	Xisto		55.5	60	4.5
Poente Norte	15+642,00	15+646,00	Xisto		55.5	60	4.5
Poente Norte	15+646,00	15+650,50	Xisto		46.5	55	8.5
Poente Norte	15+650,50	15+654,50	Xisto	Faixa de maciço alterado segundo N50°W, associado a descontinuidades com a mesma atitude	46.5	55	8.5
Poente Norte	15+654,50	15+659,00	Xisto		46.5	51	4.5
Poente Norte	15+659,00	15+662,50	Xisto		48.5	54	5.5
Poente Norte	15+662,50	15+664,00	Xisto		48.5	45	-3.5
Poente Norte	15+664,00	15+668,00	Xisto		56.5	61	4.5
Poente Norte	15+668,00	15+671,50	Xisto		55.5	58	2.5
Poente Norte	15+671,50	15+675,50	Xisto		59.5	55	-4.5
Poente Norte	15+675,50	15+680,00	Xisto		62.5	58	-4.5
Poente Norte	15+680,00	15+682,00	Xisto		62.5	58	-4.5
Poente Norte	15+682,00	15+686,00	Xisto		64.5	66	1.5
Poente Norte	15+686,00	15+690,00	Xisto		62.5	66	3.5
Poente Norte	15+690,00	15+694,50	Xisto		58.5	63	4.5
Poente Norte	15+694,50	15+698,50	Xisto		61.5	65	3.5
Poente Norte	15+698,50	15+702,50	Xisto		60.5	60	-0.5
Poente Norte	15+702,50	15+707,00	Xisto		58.5	61	2.5
Poente Norte	15+707,00	15+710,50	Xisto		54.5	59	4.5
Poente Norte	15+710,50	15+714,50	Xisto/Metassedimentos	Contacto por discordância segundo N25°E	54.5	61	6.5
Poente Norte	15+714,50	15+719,00	Metassedimentos		71.5	60	-11.5
Poente Norte	15+719,00	15+723,00	Metassedimentos		64.5	65	0.5
Poente Norte	15+723,00	15+728,00	Metassedimentos	Intrusão de Xisto cinzento no lado esquerdo	56.5	60	3.5
Poente Norte	15+728,00	15+731,50	Metassedimentos		53.5	66	12.0
Poente Norte	15+731,50	15+736,00	Metassedimentos		48.5	51	2.4

Da análise da comparação dos valores obtidos para as duas versões da classificação observa-se que na generalidade a determinação do GSI segundo Hoek et al. (2013) permite obter valores mais elevados (em média 6,89 pontos), contudo observaram-se algumas ocorrências onde se verificou o oposto, no túnel Poente Sul entre os pk's 15+793,50 e 15+808,00, zona onde se observou maciço medianamente alterado e com aumento de intensidade de fracturação, esta situação é bastante evidente tendo-se registado uma diferença de 12,5 pontos. O mesmo foi verificado no túnel Poente Norte entre os pk's 15+668,00 e 15+680,00 numa zona onde foi observada ligeira alteração do maciço no lado direito.

A figura 46 apresenta a projecção comparativa dos valores obtidos para as duas versões da classificação.

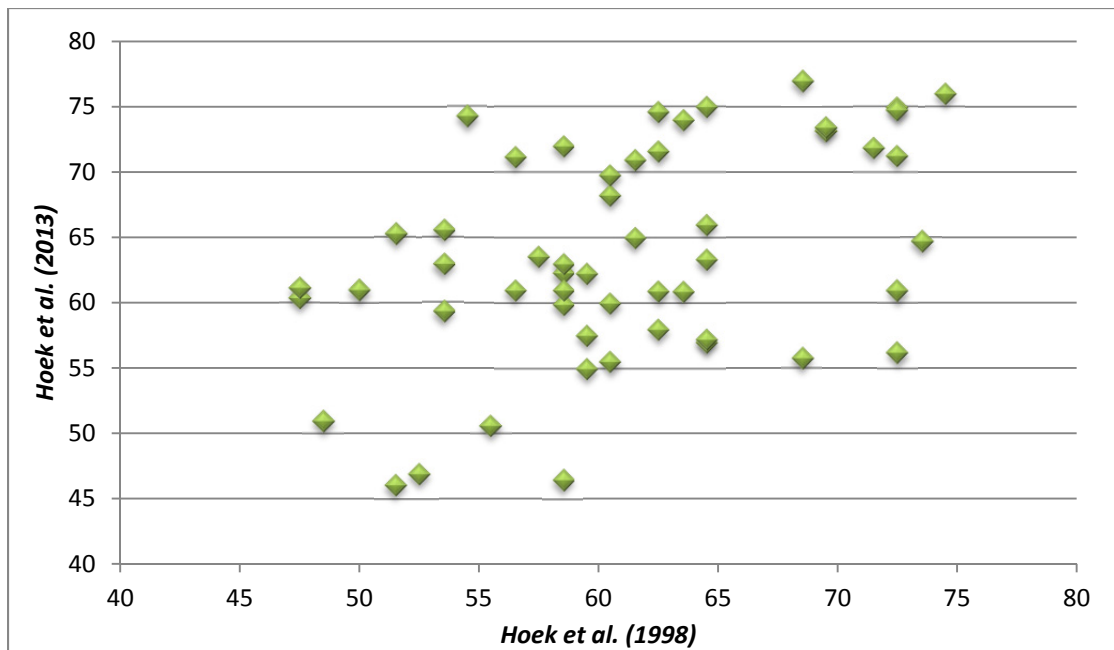


Figura 46. Comparação dos valores obtidos para cada uma das classificações Hoek et al. (1998) vs Hoek et al. (2013).

Da análise do gráfico da figura 46 é possível confirmar o acima apresentado, os valores para Hoek et al. (2013) são genericamente superiores sendo esta diferença mais regular para os valores mais altos e menos frequente para valores mais baixos, ou seja, quando as condições geotécnicas do maciço são de melhor qualidade obtém-se valores mais elevados para Hoek et al. (2013); por outro lado, em maciços com piores condições geotécnicas a classificação de GSI|2013 é mais conservadora.

Na figura 47 apresenta-se um gráfico de comparação entre as 2 versões do GSI relativamente ao RMR (Bieniawski, 1989). Uma vez mais é possível constatar que na generalidade, para valores indicadores de maciço rochoso de pior qualidade se obtém valores de GSI inferiores para a versão de 2013 (Hoek et al., 2013), em situações de maciço de qualidade razoável a diferença é menos substancial não havendo claramente uma predominância de valores mais elevados de uma versão relativamente à outra, e para maciço com melhores condições geotécnicas obtém-se genericamente valores mais elevados para a versão de 2013 (Hoek et al., 2013).

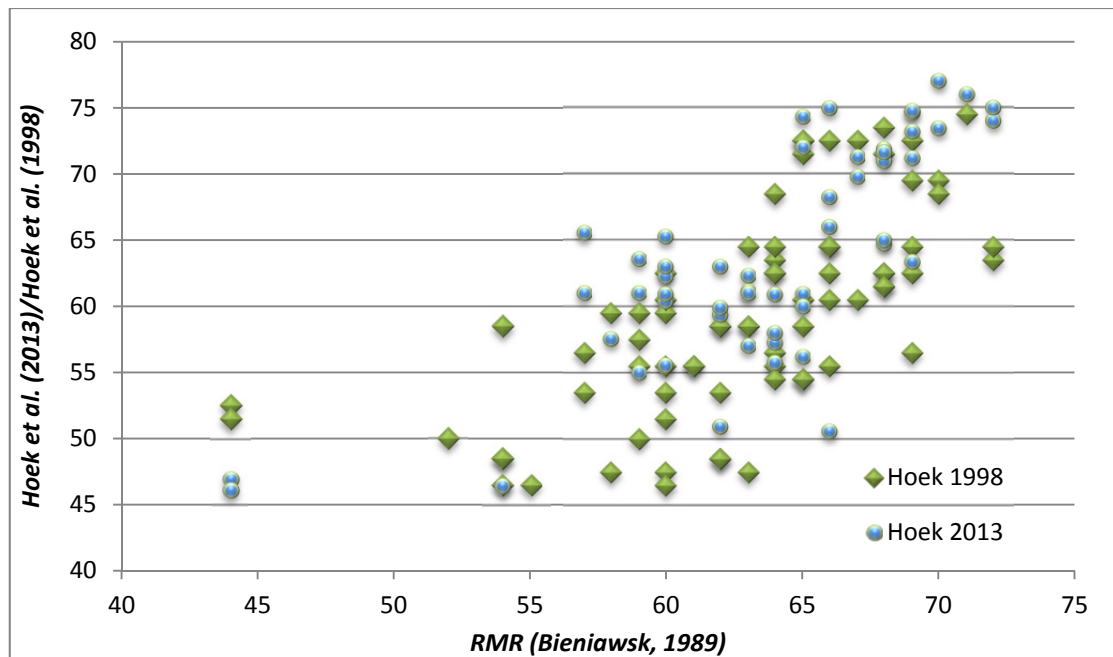


Figura 47. Comparação dos valores obtidos para cada uma das classificações Hoek et al. (1998) vs Hoek et al. (2013) para o mesmo RMR (Bieniawski, 1989).

Marinos & Hoek (2001) vs Hoek et al. (2013)

Foi já referido que a comparação entre estas duas versões da classificação de GSI requer alguns cuidados, além da diferença no método (observacional vs cálculo paramétrico), a versão do GSI2001 (Marinos & Hoek, 2001) é direccionada para um tipo específico de rocha. Por outro lado, sendo que estruturalmente a formação xistenta intersectada no âmbito deste projecto apresente algumas semelhanças com o objecto de estudo que levou à definição desta versão da classificação.

Como se mostra nos quadros 24 e 25 a comparação destas duas versões da classificação resulta num claro conjunto de valores superiores à da versão de 2013 (Hoek et al., 2013) relativamente à de 2001 (Marinos & Hoek, 2001) fundamentalmente pelo já enumerado facto de a última se destinar a um tipo específico de rocha e apresentar um quadro de classificação substancialmente diferente. Contudo, também na comparação destas duas versões é possível denotar uma inversão desta tendência nas zonas de piores condições geotécnicas como é o caso do túnel Poente Sul entre os pk's 15+793,50 e 15+808,00 onde se obtiveram valores inferiores para a versão de 2013 (Hoek et al., 2013) relativamente à de 2001 (Marinos & Hoek, 2001).

Quadro 24. Comparação das classificações Marinós & Hoek (2001) vs Hoek et al. (2013) no túnel Ponte Sul.

Frente	Pk inicial	Pk final	Litologia	Observações	Hoek 2001	Hoek 2013	Diferença
					Valor médio	GSI (c/ RQDt Priest, 1983)	
Poente Sul	15+729,00	15+733,00	Xisto Cinzento		54.5	63	8.5
Poente Sul	15+733,00	15+737,00	Quartzito fino	Contacto Xisto/Quartzito por filão de quartzo	52.5	75	22.5
Poente Sul	15+737,00	17+741,00	Quartzito fino		53.5	75	21.5
Poente Sul	17+741,00	17+746,50	Quartzito fino		51.5	71	19.5
Poente Sul	17+746,50	17+749,50	Quartzito fino		60.5	75	14.5
Poente Sul	17+749,50	15+753,00	Quartzito fino		56.5	73	16.5
Poente Sul	15+753,00	15+758,50	Metassedimentos	Contacto Quartzito/Metassedimentos por discordância com filão de quartzo	61.5	73	11.5
Poente Sul	15+758,50	15+763,00	Metassedimentos		62.5	72	9.5
Poente Sul	15+763,00	15+768,00	Metassedimentos		53.5	72	18.5
Poente Sul	15+768,00	15+773,50	Metassedimentos		54.5	71	16.5
Poente Sul	15+773,50	15+778,50	Metassedimentos		46.5	74	27.5
Poente Sul	15+778,50	15+783,50	Metassedimentos		52.5	68	15.5
Poente Sul	15+783,50	15+788,50	Metassedimentos		56.5	71	14.5
Poente Sul	15+788,50	15+793,50	Metassedimentos		51.5	70	18.5
Poente Sul	15+793,50	15+799,00	Metassedimentos	Faixas de maciço pouco a medianamente alterado a acompanhar descontinuidades com atitude N30°W;38°NE	42.5	47	4.5
Poente Sul	15+799,00	15+803,50	Metassedimentos		42.5	46	3.5
Poente Sul	15+803,50	15+808,00	Metassedimentos		49.5	46	-3.5
Poente Sul	15+808,00	15+813,00	Metassedimentos		50.5	62	11.5
Poente Sul	15+813,00	15+817,50	Metassedimentos		50.5	58	7.5
Poente Sul	15+817,50	15+821,50	Metassedimentos		51.5	65	13.5
Poente Sul	15+821,50	15+826,00	Metassedimentos		50	60	10.0
Poente Sul	15+826,00	15+830,50	Metassedimentos	Filão de quartzo	52.5	64	11.5
Poente Sul	15+830,50	15+835,00	Metassedimentos		53.5	61	7.5
Poente Sul	15+835,00	15+838,50	Metassedimentos		53.5	61	7.5
Poente Sul	15+838,50	15+842,50	Metassedimentos		52.5	56	3.5
Poente Sul	15+842,50	15+846,50	Metassedimentos		52.5	61	8.5
Poente Sul	15+846,50	15+850,50	Metassedimentos		54.5	62	7.5
Poente Sul	15+850,50	15+855,00	Metassedimentos		57.5	57	-0.5
Poente Sul	15+855,00	15+859,00	Metassedimentos	Massa de quartzo e filões de quartzo perpendiculares ao eixo	57.5	57	-0.5
Poente Sul	15+859,00	15+864,00	Metassedimentos	Fracturação intensa segundo N50°W;74°SW acompanhadas por faixa de maciço medianamente alterado	44.5	59	14.5
Poente Sul	15+864,00	15+867,50	Metassedimentos		51.5	60	8.5
Poente Sul	15+867,50	15+871,00	Metassedimentos		57.5	61	3.5
Poente Sul	15+871,00	15+876,00	Metassedimentos		57.5	56	-1.5
Poente Sul	15+876,00	15+879,50	Metassedimentos		55.5	56	0.5
Poente Sul	15+879,50	15+882,00	Metassedimentos		63.5	65	1.5
Poente Sul	15+882,00	15+887,00	Metassedimentos		47.5	51	3.5

Quadro 25. Comparação das classificações Marinos & Hoek (2001) vs Hoek et al. (2013) no túnel Ponte Norte.

Frente	Pk inicial	Pk final	Litologia	Observações	Hoek 2001	Hoek 2013	Diferença
					Valor médio	GSI (c/ RQDt Priest, 1983)	
Poente Norte	15+580,00	15+585,00	Quartzito fino		55	72	17.0
Poente Norte	15+585,00	15+590,00	Quartzito fino		62.5	77	14.5
Poente Norte	15+590,00	15+594,50	Quartzito fino		63.5	76	12.5
Poente Norte	15+594,50	15+598,50	Quartzito fino		52.5	74	21.5
Poente Norte	15+598,50	15+602,50	Quartzito fino		53.5	75	21.5
Poente Norte	15+602,50	15+607,00	Quartzito fino		43.5	72	28.5
Poente Norte	15+607,00	15+611,50	Quartzito fino/Xisto	Contacto por falha com atitude E-W	37.5	56	18.5
Poente Norte	15+611,50	15+616,50	Quartzito fino/Xisto		37.5	61	23.5
Poente Norte	15+616,50	15+619,50	Quartzito fino/Xisto		49	63	14.0
Poente Norte	15+619,50	15+623,50	Quartzito fino/Xisto		43.5	62	18.5
Poente Norte	15+623,50	15+629,00	Quartzito fino/Xisto		37.5	59	21.5
Poente Norte	15+629,00	15+633,00	Quartzito fino/Xisto		42.5	61	18.5
Poente Norte	15+633,00	15+637,50	Xisto		Filão de quartzo segundo N40°E;80°NW com 0,5m de espessura	42.5	55
Poente Norte	15+637,50	15+642,00	Xisto		42.5	61	18.5
Poente Norte	15+642,00	15+646,00	Xisto		42.5	61	18.5
Poente Norte	15+646,00	15+650,50	Xisto		42.5	55	12.5
Poente Norte	15+650,50	15+654,50	Xisto	Faixa de maciço alterado segundo N50°W, associado a descontinuidades com a mesma atitude	42.5	55	12.5
Poente Norte	15+654,50	15+659,00	Xisto		42.5	51	8.5
Poente Norte	15+659,00	15+662,50	Xisto		44.5	54	9.5
Poente Norte	15+662,50	15+664,00	Xisto		44.5	45	0.5
Poente Norte	15+664,00	15+668,00	Xisto		47.5	61	13.5
Poente Norte	15+668,00	15+671,50	Xisto		47.5	58	10.5
Poente Norte	15+671,50	15+675,50	Xisto		49.5	55	5.5
Poente Norte	15+675,50	15+680,00	Xisto	53.5	58	4.5	
Poente Norte	15+680,00	15+682,00	Xisto	55.5	58	2.5	
Poente Norte	15+682,00	15+686,00	Xisto	59.5	66	6.5	
Poente Norte	15+686,00	15+690,00	Xisto	56.5	66	9.5	
Poente Norte	15+690,00	15+694,50	Xisto	49.5	63	13.5	
Poente Norte	15+694,50	15+698,50	Xisto	52.5	65	12.5	
Poente Norte	15+698,50	15+702,50	Xisto	52.5	60	7.5	
Poente Norte	15+702,50	15+707,00	Xisto	48.5	61	12.5	
Poente Norte	15+707,00	15+710,50	Xisto	45.5	59	13.5	
Poente Norte	15+710,50	15+714,50	Xisto/Metassedimentos	Contacto por discordância segundo N25°E	45.5	61	15.5
Poente Norte	15+714,50	15+719,00	Metassedimentos		56.5	60	3.5
Poente Norte	15+719,00	15+723,00	Metassedimentos		51.5	65	13.5
Poente Norte	15+723,00	15+728,00	Metassedimentos	Intrusão de Xisto cinzento no lado esquerdo	45.5	60	14.5
Poente Norte	15+728,00	15+731,50	Metassedimentos		42.5	66	23.0
Poente Norte	15+731,50	15+736,00	Metassedimentos		39.5	51	11.4

A figura 48 apresenta a comparação entre as duas versões do GSI relativamente ao RMR (Bieniawski, 1989). É possível observar que para todos os avanços cartografados apenas em 4 casos se obteve GSI inferior para a versão 2013 (Hoek et al., 2013) para o mesmo valor de RMR (Bieniawski, 1989) o que representa 5,40% dos avanços cartografados.

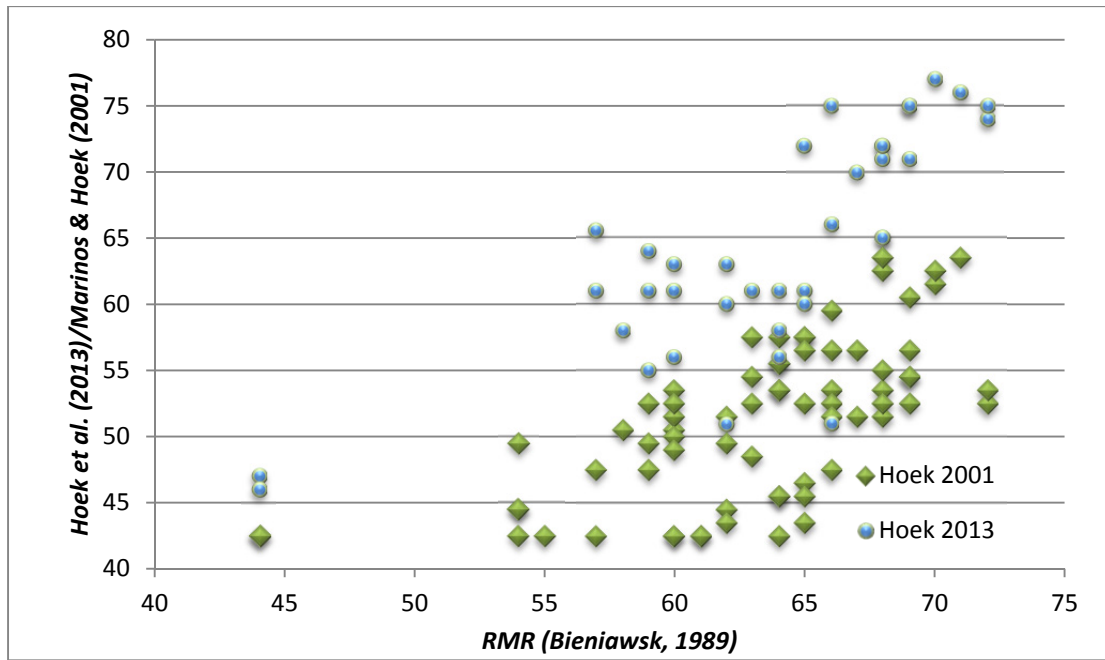


Figura 48. Comparação dos valores obtidos para cada uma das classificações Hoek et al. (1998) vs Hoek et al. (2013) para o mesmo RMR (Bieniawski, 1989).

As figuras 49 e 50 apresentam o zonamento em cada um dos túneis para cada uma das versões do GSI consideradas (GSI98: Hoek et al., 1998; GSI2001: Marinos & Hoek, 2001; GSI2013: Hoek et al., 2013) bem como para o valor de RMR (RMR89: Bieniawski, 1989). Nas mesmas é possível identificar os aspectos anteriormente referidos, sobretudo os valores de classificação superiores para a versão de 2013 (Hoek et al., 2013).

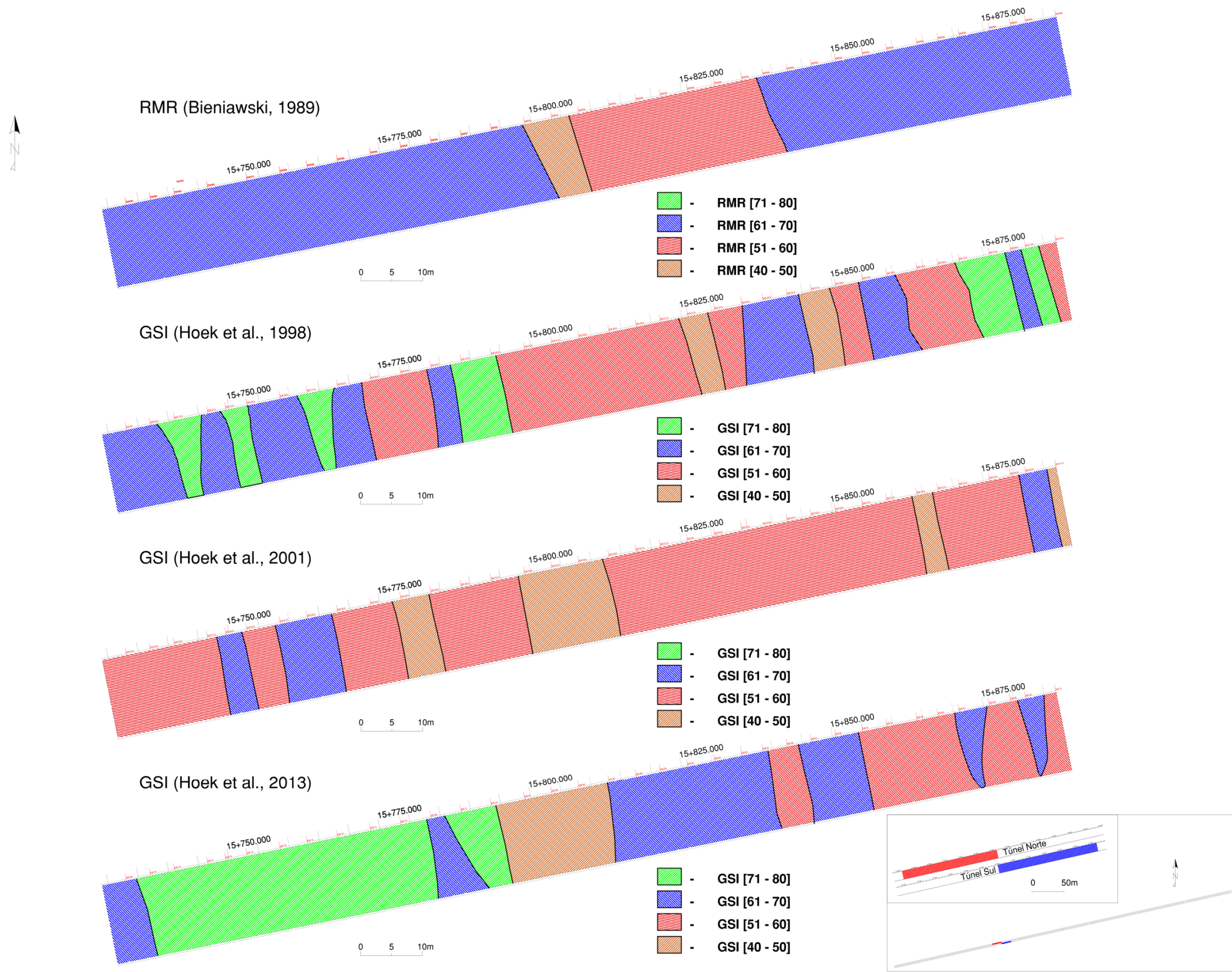


Figura 49. Zonamento para as versões de GSI (GSI98: Hoek et al., 1998; GSI2001: Marinos & Hoek, 2001; GSI2013: Hoek et al., 2013) e RMR (Bieniawski, 1989) no túnel Poente Sul.

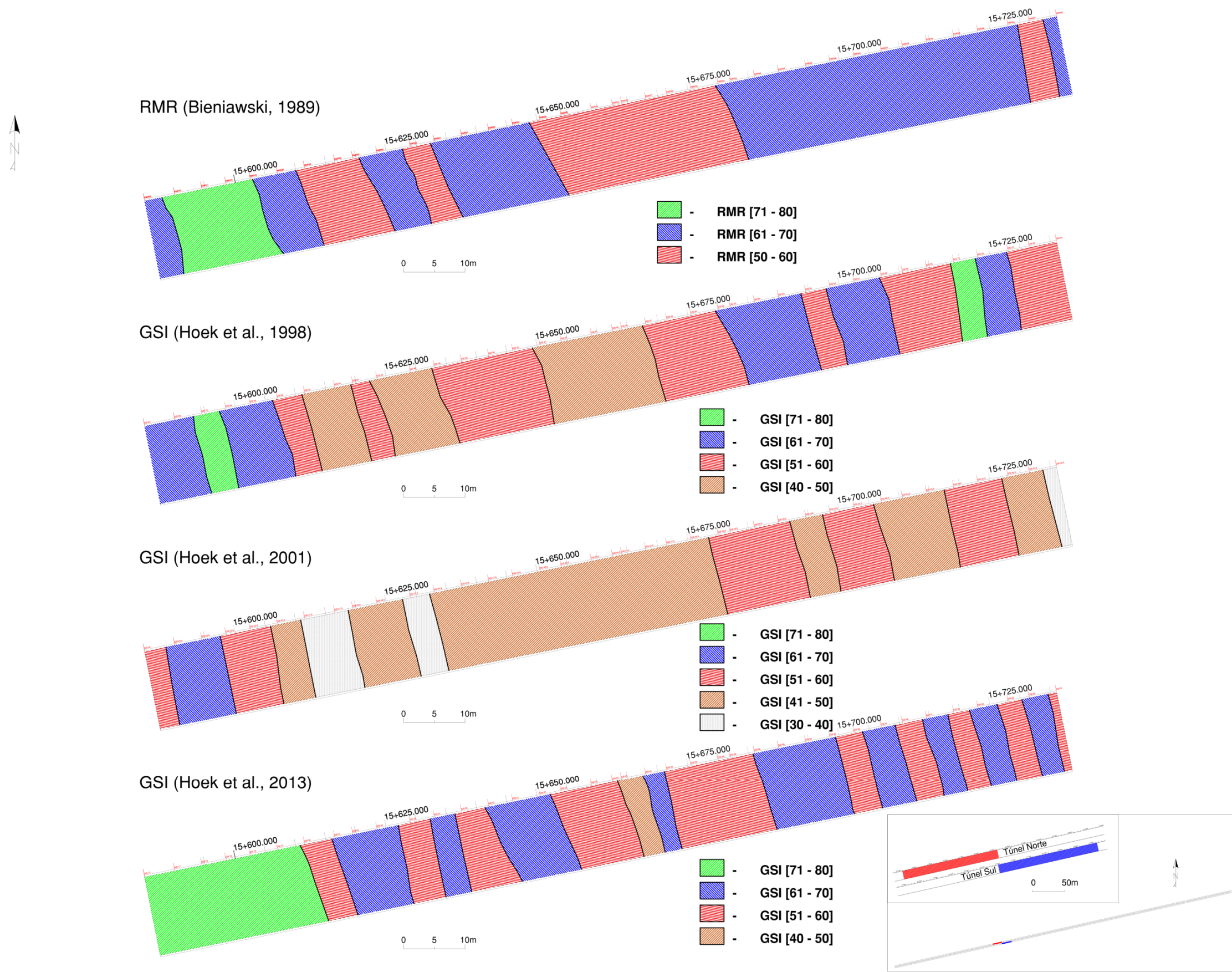


Figura 50. Zonamento para as versões de GSI (GSI98: Hoek et al., 1998; GSI2001: Marinos & Hoek, 2001; GSI2013: Hoek et al., 2013) e RMR (Bieniawski, 1989) no túnel Poente Norte.

Após efectuado o zonamento para as diferentes versões da classificação bem como para o RMR foi sobreposto o zonamento da versão 2013 do GSI (Hoek et al., 2013) ao zonamento do RMR (Bieniawski, 1989) de forma a encontrar zonas de características comuns às duas classificações e assim obter um zonamento para troços com características semelhantes.

O RMR apresentado neste trabalho foi determinado com base nas recomendações do seu autor (Bieniawski, 1989) ponderando a influência da água presente no maciço e a orientação das discontinuidades relativamente ao túnel, como tal a aplicação da correlação apresentada no ponto 2.6 ($GSI = RMR_{89} - 5$) não pareceu acertada para esta comparação. Sobre este tópico ver as considerações geomecânicas de Barton (2001, 2012) ou de Barton & Bieniawski (2008).

Túnel Sul

No túnel Sul foram caracterizadas 3 zonas que se encontram sintetizadas no quadro 26.

Quadro 26. Zonas definidas para o túnel Poente Sul.

Zona	RMR (Bieniawski, 1989)	GSI (Hoek et al., 2013)
ZGM1	61 - 70	61 - 80
ZGM2	51 - 60	51 - 60
ZGM3	40 - 50	40 - 50

Túnel Norte

No túnel Norte foram caracterizadas 3 zonas que se encontram sintetizadas no quadro 27.

Quadro 27. Zonas definidas para o túnel Poente Norte.

Zona	RMR (Bieniawski, 1989)	GSI (Hoek et al., 2013)
ZGM1	65 - 70	71 - 80
ZGM2	51 - 64	51 - 70
ZGM3	50 - 55	40 - 50

As figuras 51 e 52 apresentam o zonamento resultante da sobreposição do zonamento da versão 2013 do GSI (Hoek et al., 2013) ao zonamento do RMR (Bieniawski, 1989) para os dois túneis.

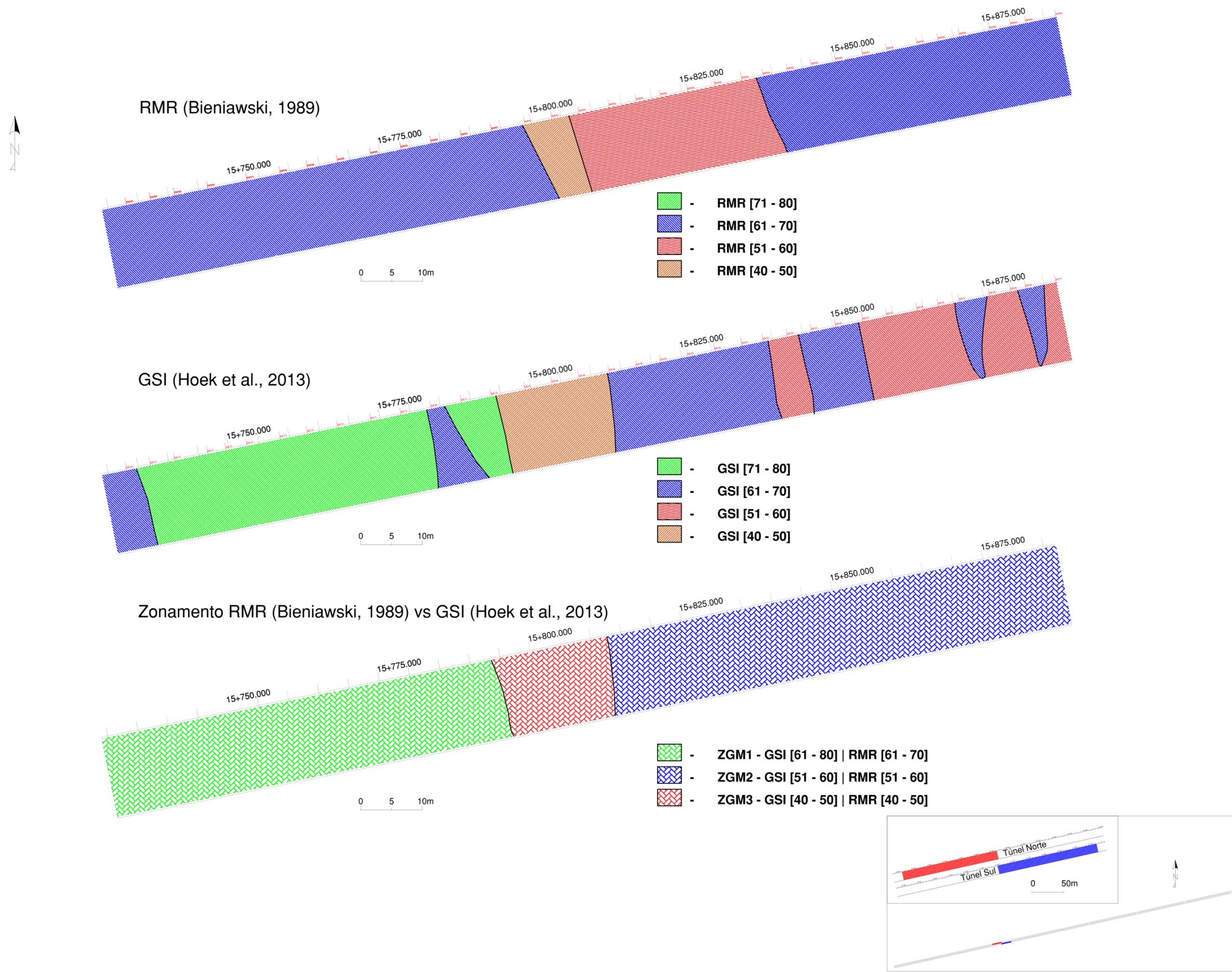


Figura 51. Zonamento resultante da sobreposição do GSI (Hoek et al., 2013) e RMR (Bieniawski, 1989) no túnel Poente Sul.

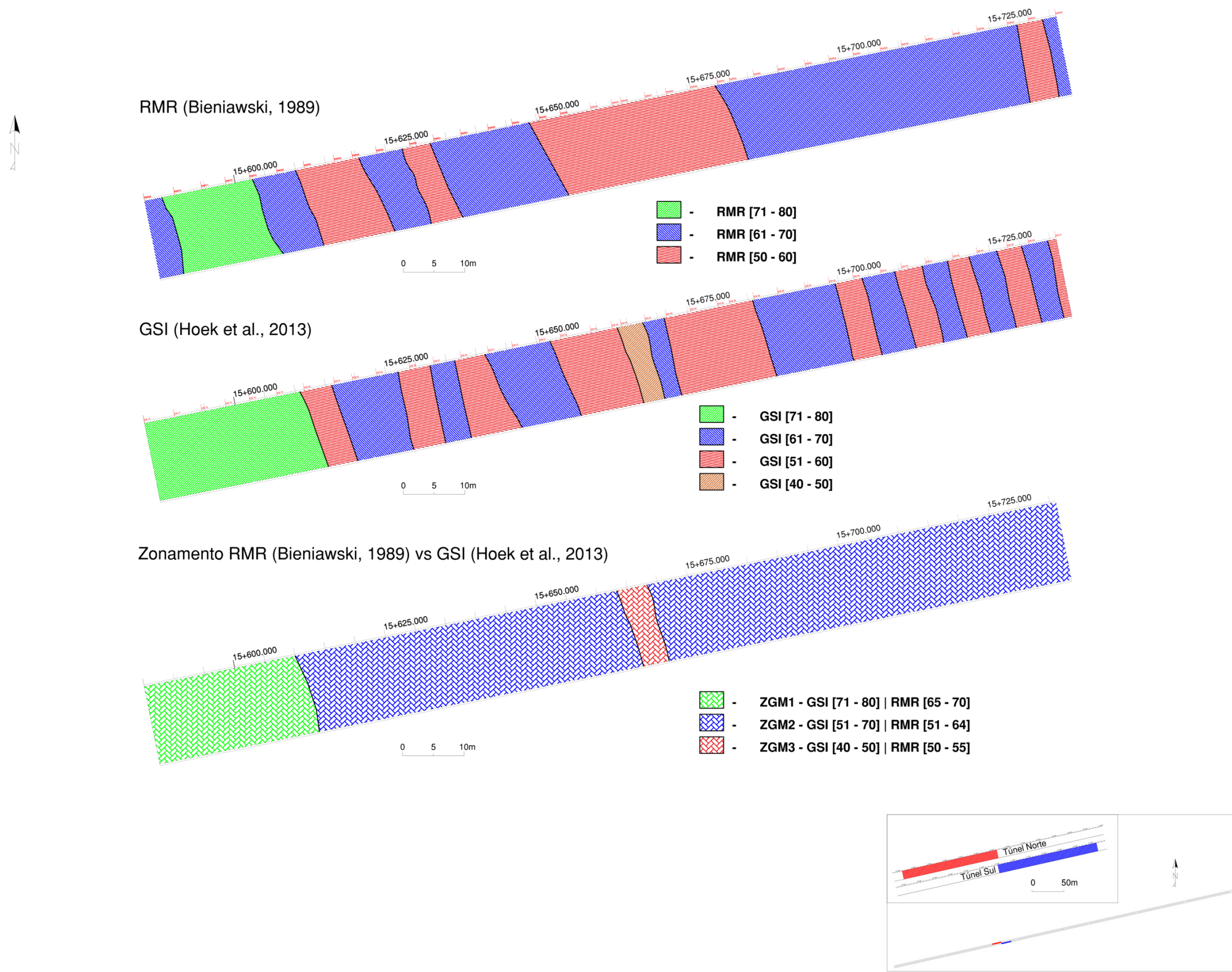


Figura 52. Zonamento resultante da sobreposição do GSI (Hoek et al., 2013) e RMR (Bieniawski, 1989) no túnel Poente Norte.

Por fim, procurou-se cruzar a informação resultante do zonamento apresentado nas figuras 51 e 52 com o zonamento geotécnico apresentado no ponto 3.5.2 de forma a obter o zonamento geomecânico final, integrando os parâmetros geotécnicos (grau de alteração, fracturação e resistência (ISRM, 1981)) e os valores obtidos para a classificação GSI 2013 (Hoek et al., 2013) e RMR (Bieniawski, 1989).

O resultado foi um zonamento para cada um dos túneis com 5 zonas geomecânicas em cada um dos túneis:

- **Túnel Sul**

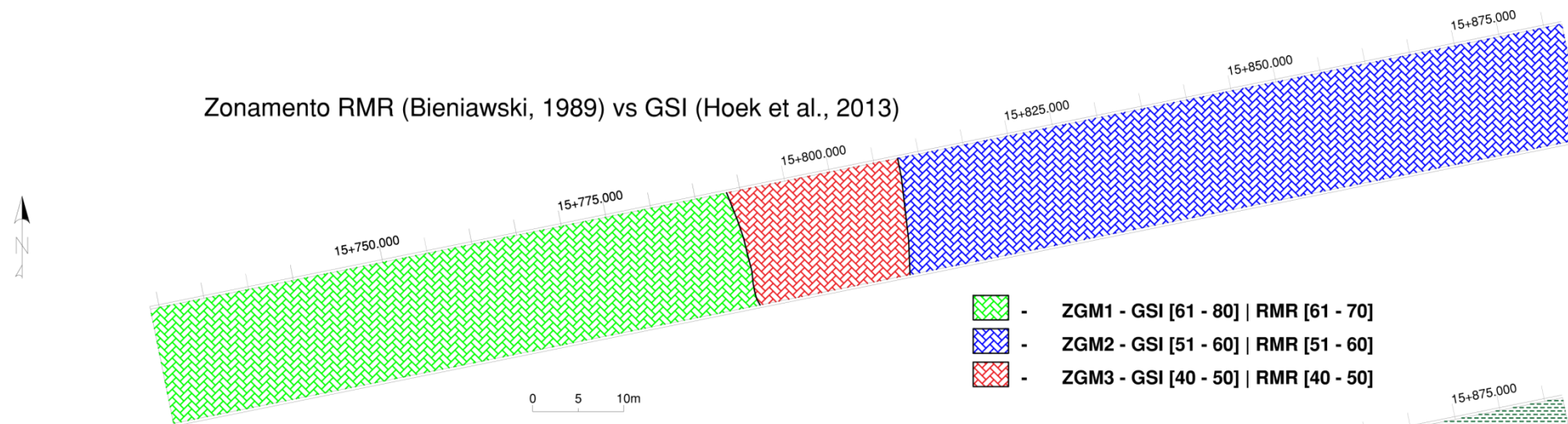
- ZGMEC Ia – Maciço constituído por Quartzito fino com intercalação de filitos, são (W₁), com fracturas afastadas a medianamente afastadas (F₂ a F₃), resistência à compressão uniaxial elevada [85 a 115 MPa], GSI₂₀₁₃ [61 a 80], RMR₈₉ [61 a 70].
- ZGMEC Ib – Maciço constituído por Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, são a pouco alterado (W₁ a W₂), com fracturas afastadas a medianamente afastadas (F₂ a F₃), resistência à compressão uniaxial elevada [60 a 85 MPa], GSI₂₀₁₃ [61 a 80], RMR₈₉ [61 a 70].
- ZGMEC Ic – Maciço constituído por Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, são a pouco alterado (W₁ a W₂), com fracturas afastadas a medianamente afastadas (F₂ a F₃), resistência à compressão uniaxial elevada [60 a 85 MPa], GSI₂₀₁₃ [51 a 60], RMR₈₉ [51 a 60].
- ZGMEC IIa – Maciço constituído por Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, pouco a medianamente alterado (W₂ a W₃), com fracturas medianamente afastadas a próximas (F₃ a F₄), resistência à compressão uniaxial média [35 a 55 MPa], GSI₂₀₁₃ [51 a 60], RMR₈₉ [51 a 60].
- ZGMEC IIb – Maciço constituído por Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, pouco a medianamente alterado (W₂ a W₃), com fracturas medianamente afastadas a próximas (F₃ a F₄), resistência à compressão uniaxial média [35 a 55 MPa], GSI₂₀₁₃ [40 a 50], RMR₈₉ [40 a 50].

- **Túnel Norte**

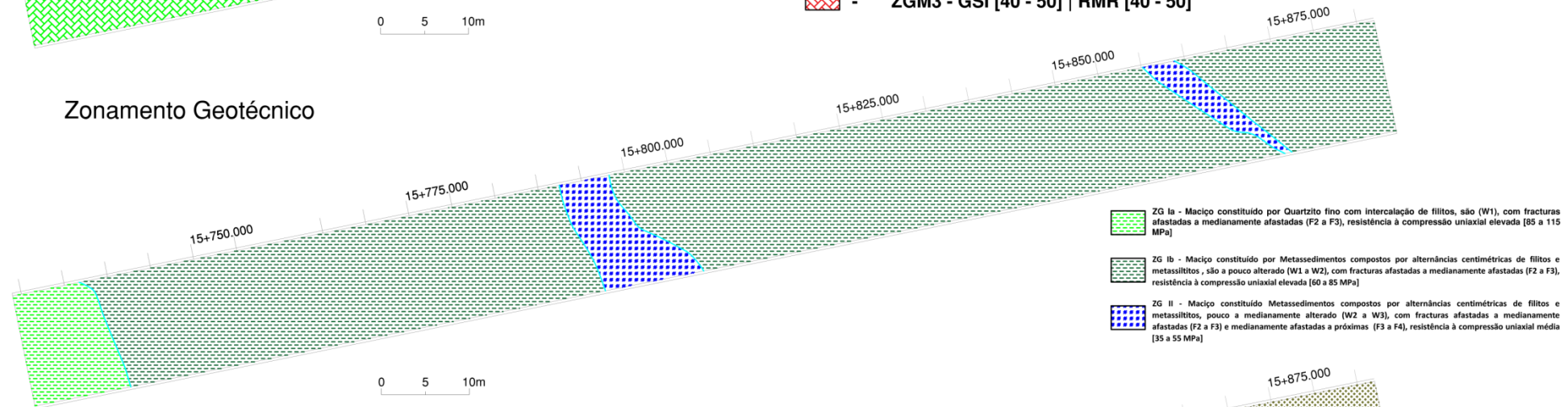
- ZGMEC Ia – Maciço constituído por Quartzito fino com intercalação de filitos, são (W1), com fracturas (F2) resistência à compressão uniaxial elevada [85 a 105 MPa], GSI₂₀₁₃ [71 a 80], RMR₈₉ [65 a 70].
- ZGMEC Ib - Maciço constituído maioritariamente por Xisto Cinzento e por Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, são (W1), com fracturas afastadas (F2), resistência à compressão uniaxial elevada [65 a 85 MPa], GSI₂₀₁₃ [51 a 70], RMR₈₉ [51 a 65].
- ZGMEC II - Maciço constituído maioritariamente por Xisto Cinzento e por Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, medianamente a pouco alterado (W3 a W2), com fracturas medianamente afastadas (F3), resistência à compressão uniaxial média [45 a 60 MPa], GSI₂₀₁₃ [40 a 50], RMR₈₉ [50 a 55].
- ZGMEC IIIa - Maciço constituído por Xisto Cinzento e Quartzito fino com intercalação de filitos, alterado (W4) com fracturas medianamente afastadas (F3), resistência à compressão uniaxial média [35 a 55 MPa], GSI₂₀₁₃ [51 a 70], RMR₈₉ [51 a 64].
- ZGMEC IIIb - Maciço constituído por Xisto Cinzento e Quartzito fino com intercalação de filitos com presença de zona de falha com cerca de 0,50m de espessura, alterado (W4) com fracturas medianamente afastadas (F3), resistência à compressão uniaxial média [35 a 55 MPa], GSI₂₀₁₃ [30 a 40], RMR₈₉ [35 a 45].

As figuras 53 e 54 apresentam o zonamento geomecânico final para os dois tuneis.

Zonamento RMR (Bieniawski, 1989) vs GSI (Hoek et al., 2013)



Zonamento Geotécnico



Zonamento Geomecânico

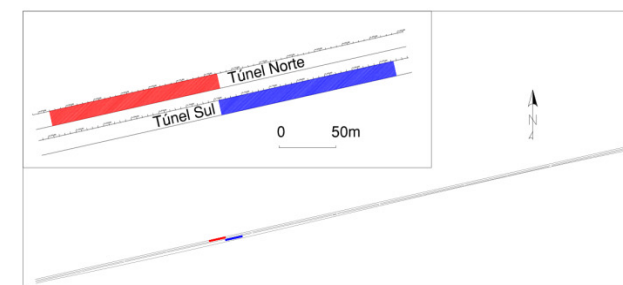
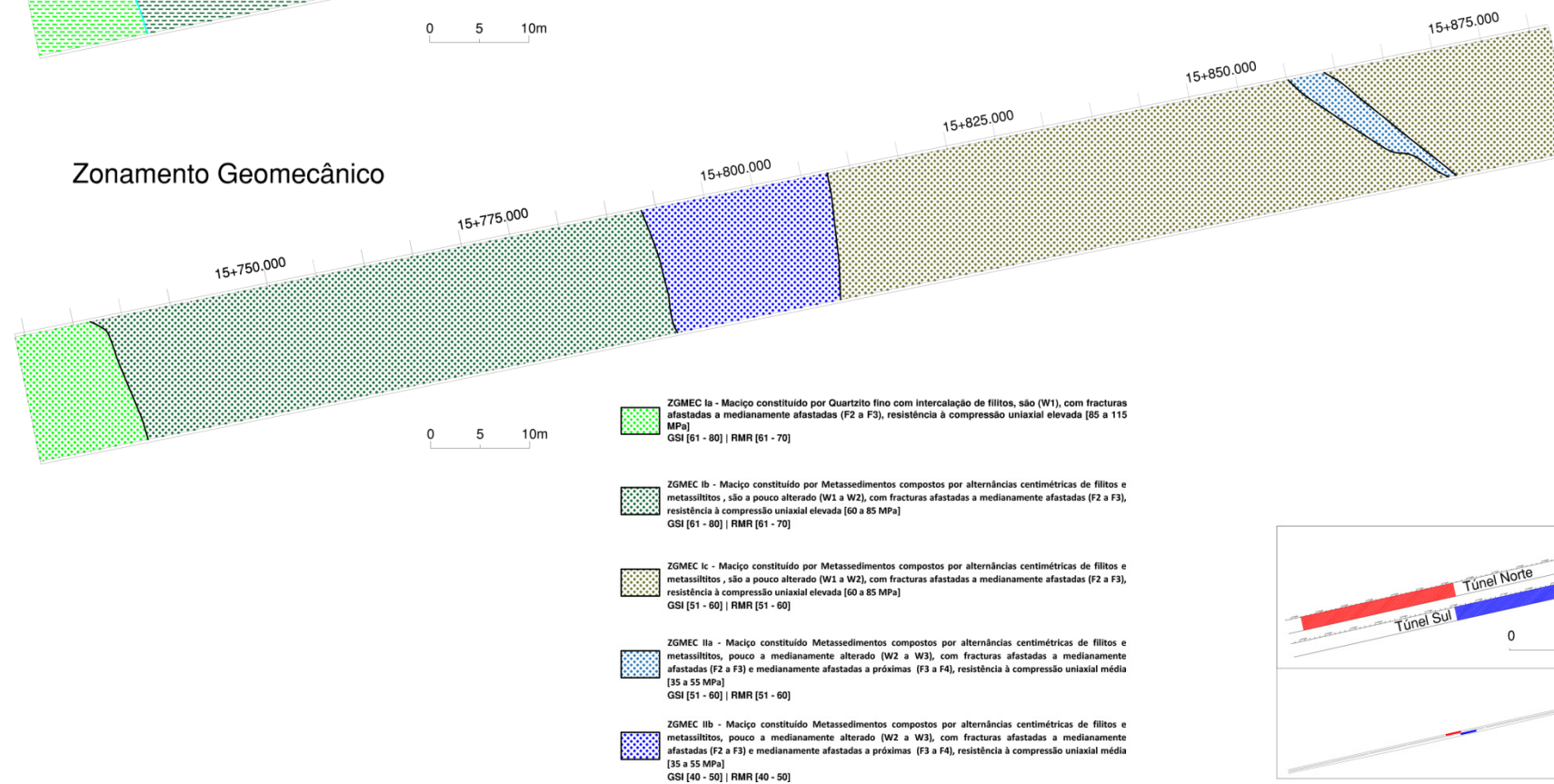
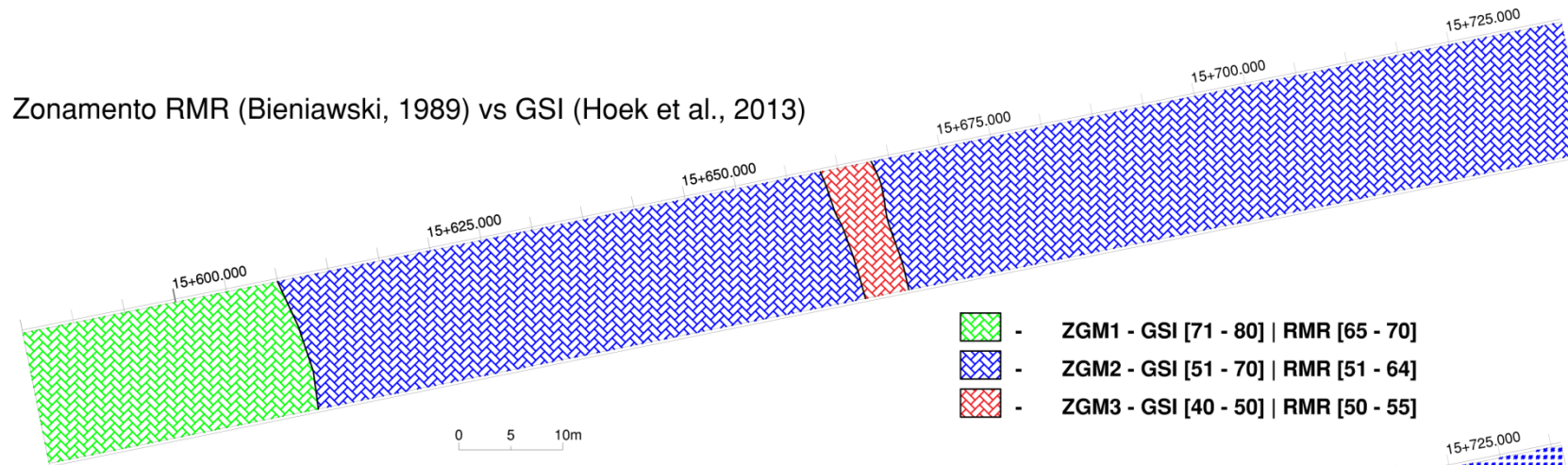
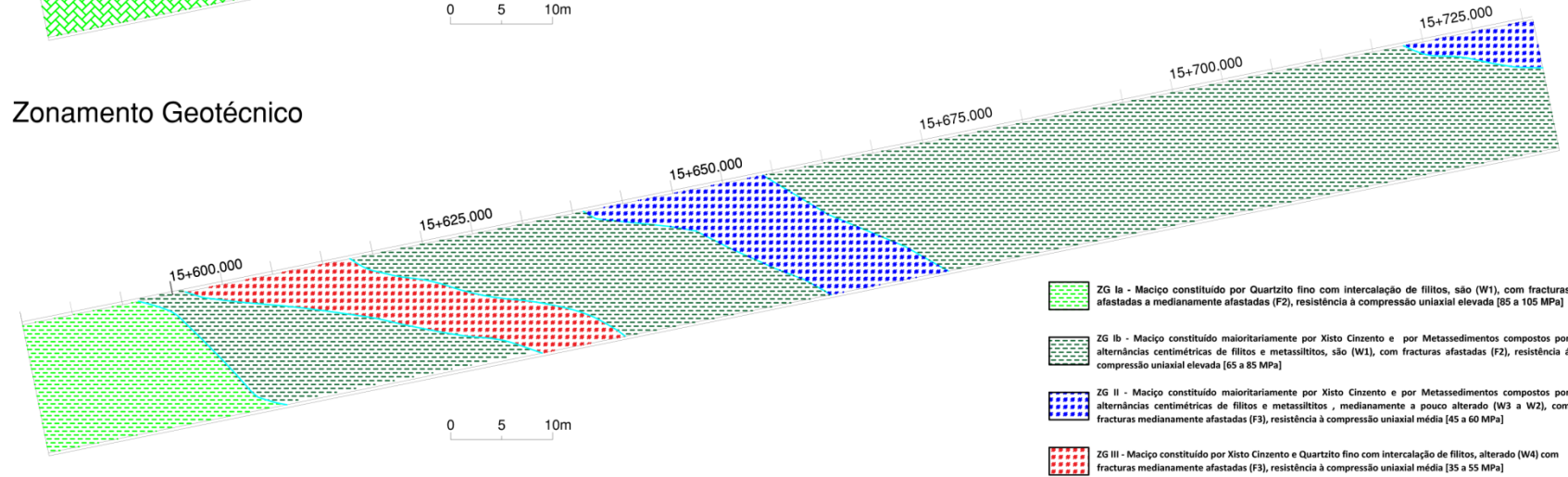


Figura 53. Zonamento Geomecânico do túnel Poente Sul.

Zonamento RMR (Bieniawski, 1989) vs GSI (Hoek et al., 2013)



Zonamento Geotécnico



Zonamento Geomecânico

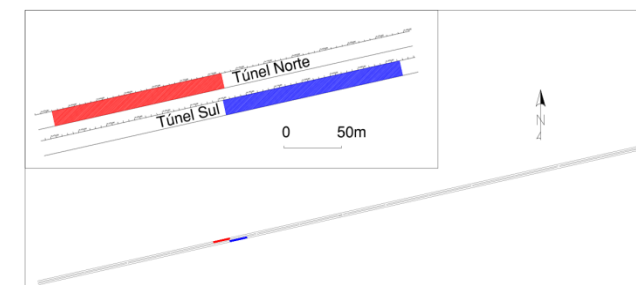
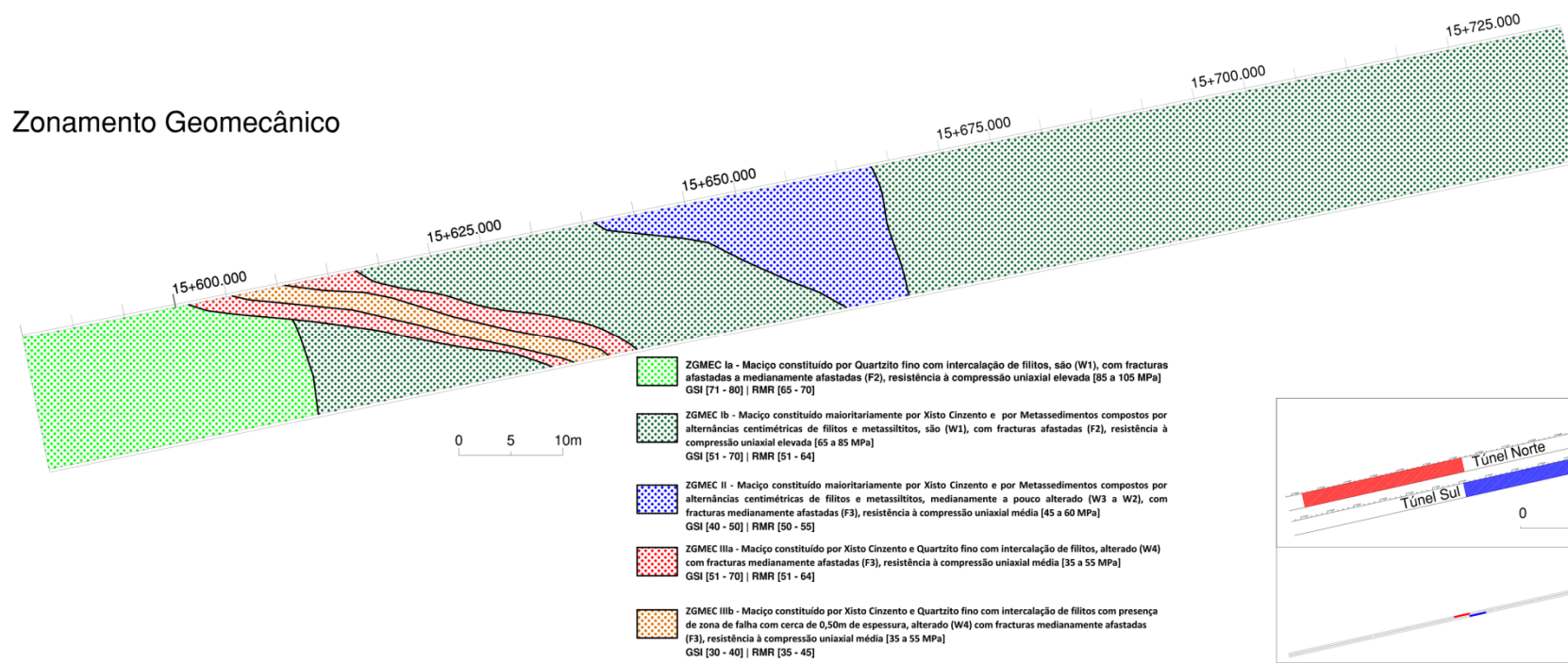


Figura 54. Zonamento Geomecânico do túnel Poente Norte.

4.

Conclusões

“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).

4. Conclusões

No presente trabalho de projecto de tese apresenta-se e discute-se a aplicação da mais recente versão do “Geological Strength Index” (GSI₂₀₁₃; Hoek et al., 2013) por comparação com outras versões do GSI (GSI₉₈: Hoek et al., 1998; GSI₂₀₀₁: Marinos & Hoek, 2001) nas frentes de escavação Poente (Túneis Norte e Sul) da empreitada de construção do Túnel do Marão.

Este estudo envolveu, inicialmente, a compilação dos levantamentos geológico-geotécnicos sistemáticos nas duas frentes de escavação (151 metros no túnel Norte e 154 metros no túnel Sul) num total de 74 avanços cartografados recorrendo à aplicação da técnica de amostragem linear em superfícies expostas do maciço rochoso da serra da Marão. Os dados recolhidos permitiram numa primeira fase definir o zonamento geotécnico para cada um dos túneis com base nas condições geológico-geotécnicas gerais (com base nos critérios da ISRM, 1981 e da CFCFF, 1996).

Através de uma análise estatística dos valores obtidos para os parâmetros geológicos-geotécnicos foi possível comparar a aplicação das diferentes versões do GSI (GSI₉₈: Hoek et al., 1998; GSI₂₀₀₁: Marinos & Hoek, 2001; GSI₂₀₁₃: Hoek et al., 2013), análise da qual resultam os seguintes aspectos conclusivos:

- A mais recente versão do “Geological Strength Index” (GSI₂₀₁₃; Hoek et al., 2013) permite uma avaliação do maciço rochoso mais rigorosa e objectiva; o resultado da sua aplicação é um valor exacto ao contrário do apresentado nas versões anteriores onde era recomendado o uso de um intervalo de valores. Esta mudança está relacionada com a diferença de metodologia no uso da classificação, as duas versões anteriores assentavam num “índice geotécnico” apresentadas neste trabalho (GSI₉₈: Hoek et al., 1998; GSI₂₀₀₁: Marinos & Hoek, 2001) baseiam-se na observação directa do maciço o que acresce algum grau de incerteza à classificação, a versão apresentada por Hoek et al. (2013) utiliza parâmetros geotécnicos na sua maioria mensuráveis para a definição do valor de GSI e conseqüentemente funcionar como uma classificação geomecânica.
- A comparação dos valores obtidos para as versões de 1998 e 2013 (GSI₉₈: Hoek et al., 1998; GSI₂₀₁₃: Hoek et al., 2013) mostram que na generalidade a versão apresenta em

2013 (Hoek et al., 2013) tende a ser mais conservadora em condições geotécnicas adversas o que se deve ao acima exposto, a quantificação dos parâmetros considerados (sobretudo os relacionados com as características das descontinuidades) diminui o grau de incerteza e refina o resultado da classificação.

- A comparação dos valores obtidos para as versões de 2001 e 2013 (GSI₂₀₀₁: Marinós & Hoek, 2001; GSI₂₀₁₃: Hoek et al., 2013) tem de ser analisada de forma cuidadosa, como referido ao longo do documento a versão publicada em 2001 foi desenvolvida para rochas do tipo *flysch* que apresentam uma identidade litoestrutural específica, com base na experiência dos autores em diversos trabalhos neste tipo de formações. Apesar de no âmbito deste projecto ter sido intersectada uma formação xistenta que estruturalmente poderia ser considerada semelhante, a aplicação da versão 2013 (Hoek et al., 2013) revelou diferenças consideráveis dos valores obtidos, embora também neste caso se tenha observado o carácter conservador da versão 2013 em situações de condições geotécnicas desfavoráveis. Assim, a versão GSI|2013 (Hoek et al., 2013) pode ser usada em maciços rochosos metassedimentares tectonizados.
- A versão de 2013 do “Geological Strength Index” (GSI|2013; Hoek et al., 2013) transmite confiança e fiabilidade para fornecer aos órgãos de decisão dados indicadores das condições geotécnicas do maciço e tem a mais-valia de ser uma classificação geomecânica de maciços rochosos tal como é, por exemplo, o RMR ou o Q-system.
- Foi ensaiado um zonamento geomecânico baseado no GSI do qual resultaram as seguintes zonas:

Túnel Sul

- ZGMEC Ia – Maciço constituído por Quartzito fino com intercalação de filitos, são (W₁), com fracturas afastadas a medianamente afastadas (F₂ a F₃), resistência à compressão uniaxial elevada [85 a 115 MPa], GSI₂₀₁₃ [61 a 80], RMR₈₉ [61 a 70].
- ZGMEC Ib – Maciço constituído por Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, são a pouco alterado (W₁ a W₂), com fracturas afastadas a medianamente afastadas (F₂ a F₃), resistência à compressão uniaxial elevada [60 a 85 MPa], GSI₂₀₁₃ [61 a 80], RMR₈₉ [61 a 70].
- ZGMEC Ic – Maciço constituído por Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, são a pouco alterado (W₁ a W₂), com fracturas afastadas a medianamente afastadas (F₂ a F₃), resistência à compressão uniaxial elevada [60 a 85 MPa], GSI₂₀₁₃ [51 a 60], RMR₈₉ [51 a 60].

-
- ZGMEC IIa – Maciço constituído por Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, pouco a medianamente alterado (W_2 a W_3), com fracturas medianamente afastadas a próximas (F_3 a F_4), resistência à compressão uniaxial média [35 a 55 MPa], GSI_{2013} [51 a 60], RMR_{89} [51 a 60].
 - ZGMEC IIb – Maciço constituído por Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, pouco a medianamente alterado (W_2 a W_3), com fracturas medianamente afastadas a próximas (F_3 a F_4), resistência à compressão uniaxial média [35 a 55 MPa], GSI_{2013} [40 a 50], RMR_{89} [40 a 50].

Túnel Norte

- ZGMEC Ia – Maciço constituído por Quartzito fino com intercalação de filitos, são (W_1), com fracturas (F_2) resistência à compressão uniaxial elevada [85 a 105 MPa], GSI_{2013} [71 a 80], RMR_{89} [65 a 70].
- ZGMEC Ib - Maciço constituído maioritariamente por Xisto Cinzento e por Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, são (W_1), com fracturas afastadas (F_2), resistência à compressão uniaxial elevada [65 a 85 MPa], GSI_{2013} [51 a 70], RMR_{89} [51 a 65].
- ZGMEC II - Maciço constituído maioritariamente por Xisto Cinzento e por Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltitos, medianamente a pouco alterado (W_3 a W_2), com fracturas medianamente afastadas (F_3), resistência à compressão uniaxial média [45 a 60 MPa], GSI_{2013} [40 a 50], RMR_{89} [50 a 55].
- ZGMEC IIIa - Maciço constituído por Xisto Cinzento e Quartzito fino com intercalação de filitos, alterado (W_4) com fracturas medianamente afastadas (F_3), resistência à compressão uniaxial média [35 a 55 MPa], GSI_{2013} [51 a 70], RMR_{89} [51 a 64].
- ZGMEC IIIb - Maciço constituído por Xisto Cinzento e Quartzito fino com intercalação de filitos com presença de zona de falha com cerca de 0,50m de espessura, alterado (W_4) com fracturas medianamente afastadas (F_3), resistência à compressão uniaxial média [35 a 55 MPa], GSI_{2013} [30 a 40], RMR_{89} [35 a 45].

Como investigações futuras poder-se-ão apontar as seguintes linhas:

- A continuação da aplicação da versão de GSI de 2013 (Hoek et al., 2013) em comparação com a versão de 1998 (Hoek et al., 1998) por forma a cimentar o grau de confiança na mais recente versão e a fomentar a sua aplicação em futuros projectos cada vez com menor grau de incerteza.
- Dada a importância do trabalho desenvolvido em 2001 por Marinós & Hoek (Marinos & Hoek, 2001) no desenvolvimento de um quadro de classificação para rochas do tipo flysch, será importante a adaptação do novo quadro de classificação (GSI|2013; Hoek et al., 2013) para estas formações, com a quantificação dos parâmetros e a atribuição de um valor exacto.
- Estabelecer um quadro correlativo e/ou comparativo entre o GSI|2013 (Hoek et al., 2013) e as últimas versões das classificações RMR (Bieniawski et al., 2014), Q-system (NGI, 2013) e outras classificações (SRC, RMI, SMR, etc.)
- A presença de água subterrânea no maciço é de relevada importância na avaliação comportamental dos maciços rochosos; o GSI não considera este parâmetro na sua avaliação pelo que será importante avaliar a influência deste factor na aplicação da classificação em termos hidrogeomecânicos.

5.

Referências

5. Referências

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

Aydin A. (2015). ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version. In: Ulusay R. (ed.), *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014*. Springer, Cham, Heidelberg, pp. 25-33.

Aydin A., Basu A. (2005). The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, 81:1-14.

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 Julho de 2015).

Barton N. (2012). From empiricism, through theory, to problem solving in rock engineering: a shortened version of the 6th Müller Lecture. *ISRM News Journal* 14: 60–66.

Barton N., Bieniawski Z.T. (2008). RMR and Q-setting records straight. *Tunnels and Tunnelling International*, Feb. 2008, pp. 26-29.

Barton N., Choubey V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 1/2: 1-54.

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

Barton N., Lien R., Lunde J. (1977). Estimation of support requirements for underground excavations. In: *Proceedings 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.

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

Bell F.G. (1992). *Engineering in rock masses*. Butterworth-Heinemann Ltd., London. 580 pp.

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

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. 3rd Edition, George Allen & Unwin, London, 527 pp.

Brown E.T., 1981. 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.

Carter T.G., Diederichs M.S., Carvalho J.L. (2008). Application of modified Hoek-Brown transition relationships for assessing strength and post-yield behaviour at both ends of the rock competence scale. In: *Proceedings of the SAIMM, SANIRE and ISRM 6th International Symposium on Ground Support in Mining and Civil Engineering Construction*, p. 37-58.

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., Afonso M.J., Ramos L., Pinheiro R. (2015). Scanline sampling techniques for rock engineering surveys: insights from intrinsic geologic variability and uncertainty (Chapter 61). In: Giordan D., Thuro K., Carranza-Torres C., Wu F., Marinos P., Delgado C. (eds.), *Engineering Geology for Society and Territory – Applied Geology for Major Engineering Projects*, IAEG, Springer, 6: 357-361.

Chaminé H.I., Afonso M.J., Teixeira J., Ramos L., Fonseca L., Pinheiro R., Galiza A.C. (2013). Using engineering geosciences mapping and GIS-based tools for georesources management: lessons learned from rock quarrying. *European Geologist Magazine, Journal of the European Federation of Geologists*, 36: 27-33.

Chaminé H.I., Dias A.G., Dinis da Gama C. (2001). Estudo geológico e geomecânico do maciço granítico de Lamoso, Paços de Ferreira, NW de Portugal. *Geociências, Rev. Univ. Aveiro*, 15:79-92.

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

Coke C. (1992). Análise estrutural de um sector do autóctone da Serra do Marão. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 122 p. (Tese de Mestrado).

Coke C. (2000). Evolução geodinâmica do ramo sul da Serra do Marão um caso de deformação progressiva em orógenos transpressivos. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 330 p. (Tese de Doutoramento).

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

Deere D.U. (1963). Technical description of rock cores for engineering purposes. *Rock mechanics and engineering geology/ Felsmechanik und Ingenieurgeologie*, 1(1): 1-18.

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.

Dias R., Ribeiro A. (1995). The Ibero-Armorican arc: a collision effect against an irregular continent?. *Tectonophysics* 246: 113-128.

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.

Ferrer M., González de Vallejo L. [eds.] (2007). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. 2 Edición. Publicaciones ITGE, Madrid.

Fonseca L., Ramos L., Galiza A.C., Chaminé H.I. (2010). Avaliação geomecânica de maciços rochosos fracturados e as tecnologias de perfuração: consequências técnico-económicas. In: Actas do 12º Congresso Nacional de geotecnia, SPG/UM, Guimarães, 10 pp. (CD-ROM).

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

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

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

GSE [Geological Society Engineering Group Working Party Report] (1995). The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology, Geological Society*, 28(3):207-242.

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

Hoek E. (1998). Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 35(1): 63-68.

Hoek E. (1999). Putting numbers to geology: an engineer's viewpoint. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 32(1): 1-19.

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

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., Brown E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 34(8): 1165-1186.

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., Carter T.G., Diederichs M.S. (2013). Quantification of the geological strength index chart. In: *Proceedings geomechanics symposium 47th US rock mechanics, San Francisco, CA, ARMA 13-672*, pp 1–8.

Hoek E., Diederichs, M.S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43(2): 203-215.

Hoek E., Kaiser R.K., Bawden W.E. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*. A.A. Balkema, Rotterdam, 215 pp.

Hoek E., Marinos P. (2000). Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses: Part 1 (estimating rock mass strength); Part 2 (potential squeezing problems in deep tunnels). *Tunnels and Tunnelling International*, 132(12):1-21.

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., 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., 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.

Hudson J.A., Cosgrove J.W. (1997). Integrated structural geology and engineering rock mechanics approach to site characterization. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abs.*, 34(3/4):136.1–136.15.

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

Hudson J.A.; Priest S.D. (1983). Discontinuity frequency in rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20(2):75-89.

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. 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 (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.

ISRM – International Society for Rock Mechanics (2015). The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014. In: Ulusay R., ed., suggested methods prepared by the commission on testing methods, ISRM. Springer, Cham, Heidelberg. 293 pp.

ITA – Austria (2012). 50 years of NATM Experience Reports. International Tunnelling and Underground Space Association, ITA, Wien, Austria.

Kahraman S. (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 38: 981-94.

Katza O., Rechesa Z., Roegiersc J.C. (2000). Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 37: 723-728.

Lamas L.N. (1989). Estudo da compartimentação de maciços rochosos por uma técnica de amostragem linear e dos blocos formados pelas descontinuidades: aplicação a uma galeria do Alto Lindoso. In: *Actas do 3º Congresso Nacional Geotecnia, Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 3: C33-C44.

Mahé S. Gasc-Barbier M., Soliva R. (2015). Joint set intensity estimation: comparison between investigation modes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74(1): 171-180.

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

Marinos P., Hoek E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. *Bull. Eng. Geol. Env.*, 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., 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. (2012). Assessing rock mass behaviour for tunnelling. *Environmental and Engineering Geoscience* 18(4):327–341.

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

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.

NGI [Norwegian Geotechnical Institute] (2013). Using the Q-system: Rock mass classification and support design. NGI handbook, Oslo, 56 pp.

Oliveira R. (1987). Engineering geological investigations of rock masses for Civil Engineering projects and mining operations. Memória LNEC, Lisboa, 693: 1-28.

Oliveira R. (1990). Geologia de Engenharia: notas de aulas do curso de mestrado de geologia de engenharia. Universidade Nova de Lisboa, Costa da Caparica. (policopiado).

Palmström A. (1995). RMI: a rock mass characterization system for rock engineering purposes. University of Oslo, 400 p. (PhD Thesis).

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. Struct. Geol., 28(2): 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(1): 109-119.

Pereira E. (1987). Estudo geológico estrutural da região de Celorico de Bastos e sua interpretação geodinâmica. Universidade de Lisboa, 274 p. (Tese de Doutoramento).

Pereira E., Ribeiro A., Marques F., Munhá J., Castro P., Meireles C., Ribeiro M.A., Pereira D., Noronha F., Ferreira N. (2001). Carta Geológica de Portugal, escala 1/200 000. Folha 2, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Pinheiro R. (2013). Classificações geomecânicas mineiras para o dimensionamento de maciços rochosos: o aplicativo MGC-RocDesign|Calc. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (tese de mestrado).

Pinheiro R., Ramos L., Teixeira J., Afonso M.J., Chaminé H.I. (2014). MGC-RocDesign|CALC: a geomechanical calculator tool for rock design. In: L.R. Alejano, A. Perucho, C. Olalla & R. Jiménez (Eds.), Proceedings of Eurock2014, Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses (ISRM European Regional Symposium, Vigo, Spain, 26-28 May 2014), CRC Press/Balkema Taylor & Francis Group, London, p. 655-660. (on pen-drive insert, ISRM Paper CH100).

Priest S.D. (1993). Discontinuity analysis for rock engineering. Kluwer Academic Publishers. 473 pp.

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).

Ribeiro A., Antunes M.T., Ferreira M.P., Rocha R.B., Soares A.F., Zbyszewski G., Almeida F.M., Carvalho D., Monteiro J.H. (1979). Introduction à la géologie générale du Portugal, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 114 pp.

Ribeiro A., Munhá J., Dias R., Mateus A., Pereira E., Ribeiro L., Fonseca P.E., Araújo A., Oliveira J.T., Romão J., Chaminé H.I., Coke C. & Pedro J. (2007). Geodynamic evolution of the SW Europe Variscides. *Tectonics*, 26, TC6009, 24 pp.

Ribeiro A., Quesada C., Dallmeyer R.D. (1990). Geodynamic evolution of the Iberian Massif. In: Dallmeyer R.D. & Martínez-García E. (Eds.), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 397-410.

Ribeiro A., Silva J. B., Dias R., Araújo A., Marques F., Merino H., Fonseca P.E. (1988). Geodynamics and deep structure of the Variscan Fold Belt in Iberia. In: *Proceedings of the fifth workshop on the European Geotraverse (EGT), Project – The Iberian Peninsula*, pp. 57-64.

Rocha M. (2013a). *Mecânica das Rochas*. Edição no âmbito das comemorações do centenário do nascimento do Engenheiro Manuel Rocha - 1913-2013. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 436 pp.

Rocha M. (2013b). *Estruturas subterrâneas: túneis, cavernas, poços*. Edição no âmbito das comemorações do centenário do nascimento do Engenheiro Manuel Rocha - 1913-2013. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 158 pp.

Sá A., Meireles C.A., Coke C., Gutiérrez-Marco J.C. (2005). Unidades litoestratigráficas do Ordovícico da região de Trás-os-Montes (Zona Centro-Ibérica, Portugal). *Comunicações Geológicas*, Lisboa, 92: 31-73.

Schmidt E. (1951). A non-destructive concrete tester. *Concrete*, 59(8): 34-35.

Serafim J.L., Pereira J.P. (1983). Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski. In: *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and Underground Constructions*, p. 1133-1144.

Singh B., Goel R.K. (2011). *Engineering rock mass classification: tunneling, foundations, and landslides*. Butterworth-Heinemann, Elsevier Inc., 365 pp.

Smith J.V. (2004). Determining the size and shape of blocks from linear sampling for geotechnical rock mass classification and assessment. *Journal of Structural Geology*, 26(6-7):1317–1339.

Sodré Borges F. (2002). *Geologia Estrutural*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. (policopiado).

Terzaghi R.D. (1965). Sources of errors in joint surveys. *Géotechnique*, 15:287-304.

Tsiambaos G., Saroglou H. (2010). Excavability assessment of rock masses using the Geological Strength Index (GSI). *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 69: 13-27.

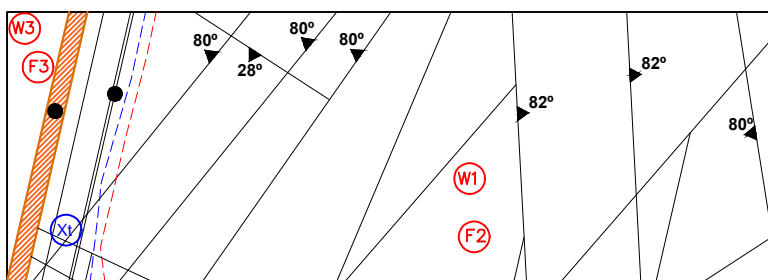
von Rabcewicz L. (1964/65). The New Austrian Tunnelling Method. *Water Power*, part I – 16(11): 453–457; part II – 16(12): 511–515; part III – 17(1): 19–24.

Watkins H., Bond C.E., Healy D., Robert, Butler R.W.H. (2015). Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterise heterogeneous fracture networks at outcrop. *Journal Structural Geology*, 72:67-82.

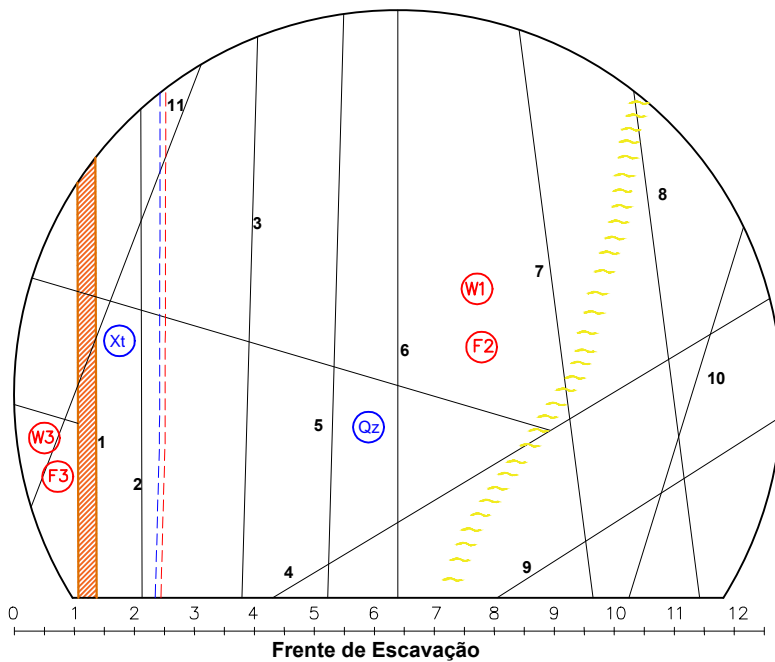
Zuquette L.V., Gandolfi N. (2004). *Cartografia geotécnica*. Oficina de textos, Brasil, 189 pp.

Anexo 1

Exemplo de ficha de levantamento geológico-geotécnico de frentes de escavação subterrâneas (túnel do Marão) – Túnel Poente Norte, pk 15+611,50



Abóbada



Frente de Escavação

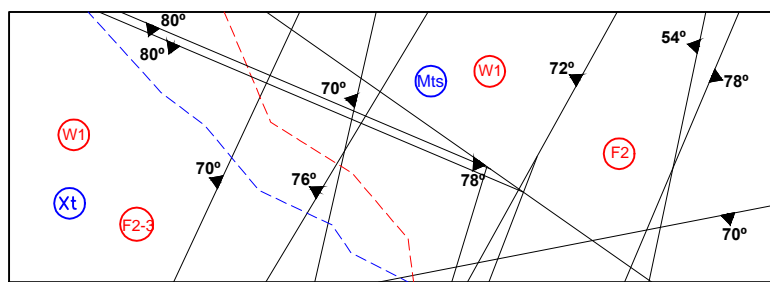
Legenda:

- | | | | |
|------------------|-----------------------|---|---------------------|
| Dicalase | Zonamento W/F | Diaclasamento inclinado | Qz Quartzitos |
| Falha | Filão de Quartzo | Diaclasamento vertical/subvertical | Xi Xistos Cinzentos |
| Limite Geológico | Ponto de Água X l/min | W., F. Critérios de alteração e fraturação (SIMR) | |

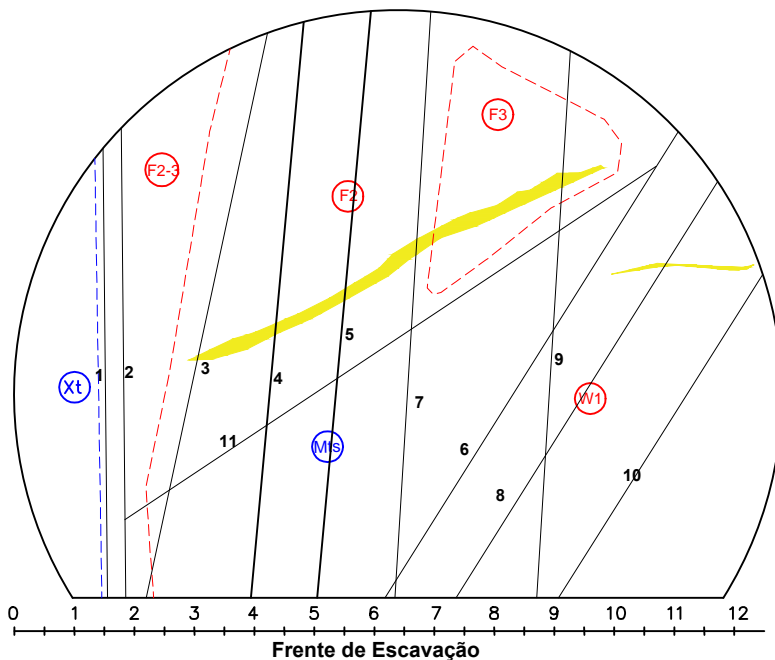


Anexo 2

Exemplo de ficha de levantamento geológico-geotécnico de frentes de escavação subterrâneas (túnel do Marão) – Túnel Poente Norte, pk 15+719,00



Abóbada



Legenda:

- | | | | | | | | |
|--|------------------|--|------------------|--|---|--|---------------------|
| | Dicalase | | Zonamento W/F | | Diaclasamento inclinado | | Qtz Quartzitos |
| | Falha | | Filão de Quartzo | | Diaclasamento vertical/subvertical | | Xt Xistos Cinzentos |
| | Limite Geológico | | Ponto de Água | | W.:.F. Critérios de alteração e fraturação (SIMR) | | |
| | | | X i/min | | | | |



**FICHA DE LEVANTAMENTO GEOLÓGICO-GEOMECÂNICO
TÉCNICA DA AMOSTRAGEM LINEAR (Scanline)**

Orientação
do Perfil: N130W
da "Scanline": N130W
Altura da "scanline" ao solo (m): 0

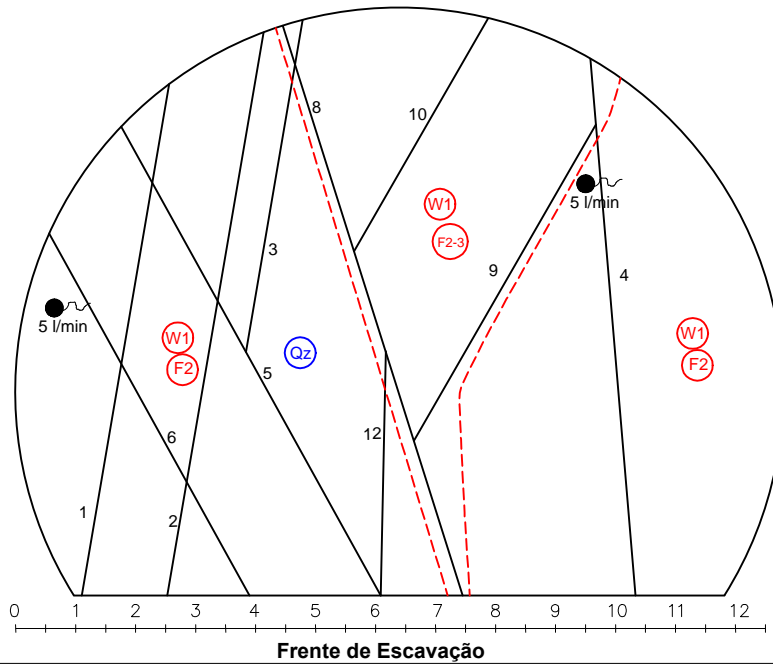
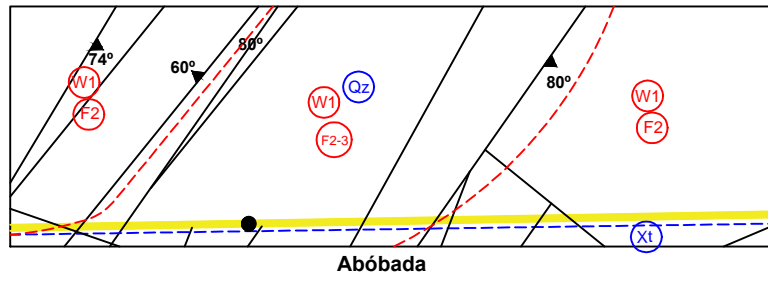
Data: 02-05-2015
Localização: Poente Norte
pk: 15+719,00

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

Descontinuidade e nº	Distância à origem (m) D	Litologia	Grau de alteração		Atitude Dir./Inc.	Tipo de descontinuidade (F-falha; D-diacfase)	Abertura (mm)		Grau de fraturação (cm) (Fracture intercept)	Semi-comprimento (L) (m)		Terminação T	Curvatura C	Rugosidade R	Tipo de enchimento	Presença de água	Observações	
			Tipo	Classificação			Valor	Classificação		Valor	Acima da Scanline							Abaixo da Scanline
1	1.55	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	N10°E;80°NW	D	1	Aberta	30.00	F3	7.50	0.00	O	C,1	O,2	Qtz	H	
2	1.85	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	N10°E;80°NW	D	1	Aberta	25.00	F3	7.85	0.00	O	C,1	O,2	Qtz	H	
3	2.20	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	N22°E;78°NW	D	0.1	Fechada	60.00	F3	9.65	0.00	O	C,1	O,2	Qtz	H	
4	3.95	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	N78°W;70°NE	D	0.5	Fechada	70.00	F2	9.65	0.00	O	C,1	O,2	SP	S	
5	5.05	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	N78°W;70°NE	D	0.5	Fechada	55.00	F3	9.85	0.00	O	C,1	O,2	SP	S	
6	6.15	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	N78°E;54°NW	D	1	Aberta	40.00	F3	9.20	0.00	O	C,1	O,2	SP	S	
7	6.35	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	N72°W;76°NE	D	0.1	Fechada	90.00	F2	9.80	0.00	O	C,1	O,2	SP	S	
8	7.35	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	N78°E;54°NW	D	1	Aberta	60.00	F3	8.20	0.00	O	C,2	O,2	SP	S	
9	8.70	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	N72°W;76°NE	D	0.1	Fechada	120.00	F2	9.15	0.00	O	C,1	O,2	SP	S	
10	9.05	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	N86°E;60°NW	D	1	Aberta	80.00	F2	6.40	0.00	O	C,1	O,2	SP	S	
11		Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	N86°E;44°NW	D	1	Aberta	150.00	F2	10.65	0.00	D	C,2	O,2	SP	H	
12	Hasteal	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	N89°E;90°	D	0.5	Fechada	120.00	F2	6.90	0.00	O	C,1	O,2	Qtz	S	
13	Hasteal	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	N66°W;80°SW	D	0.1	Fechada	90.00	F2	6.90	0.00	O	C,1	O,2	SP	S	
14	Hasteal	Xisto Cinzento	W1	Sã ou não alterada	N12°E;74°SE	D	0.5	Fechada	60.00	F3	6.90	0.00	O	C,1	O,3	Qtz	H	
15	Hasteal	Xisto Cinzento	W1	Sã ou não alterada	N68°E;72°SE	D	0.1	Fechada	55.00	F3	6.45	0.00	D	C,1	O,3	SP	S	
*Metassedimentos compostos por alternâncias centimétricas de filitos e metassiltos																		

Anexo 3

Exemplo de ficha de levantamento geológico-geotécnico de frentes de escavação subterrâneas (túnel do Marão) – Túnel Poente Sul, pk 15+737,00



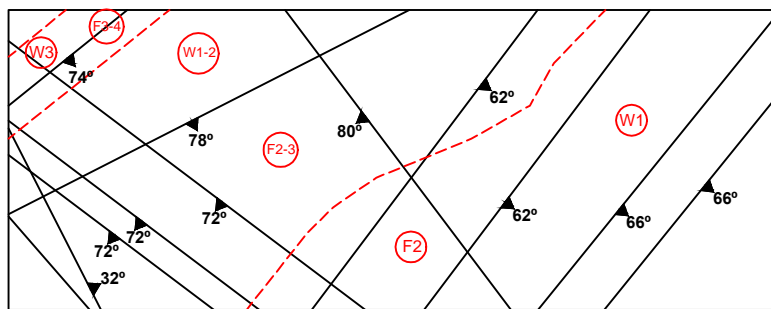
Legenda:

- | | | | | | | | |
|--|------------------|--|--------------------------|--|---|--|------------------|
| | Dicalase | | Zonamento W/F | | Diacasamento inclinado | | Quartzitos |
| | Falha | | Filão de Quartzo | | Diacasamento vertical/subvertical | | Xistos Cinzentos |
| | Limite Geológico | | Ponto de Água
X l/min | | W...; F... Critérios de alteração e fraturação (SIMR) | | |

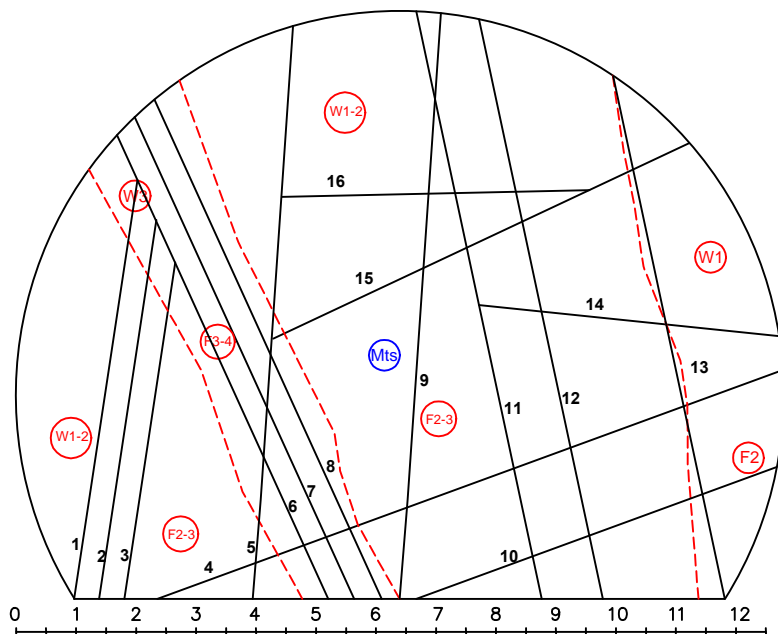


Anexo 4

Exemplo de ficha de levantamento geológico-geotécnico de frentes de escavação subterrâneas (túnel do Marão) - Túnel Poente Sul, pk 15+864,00



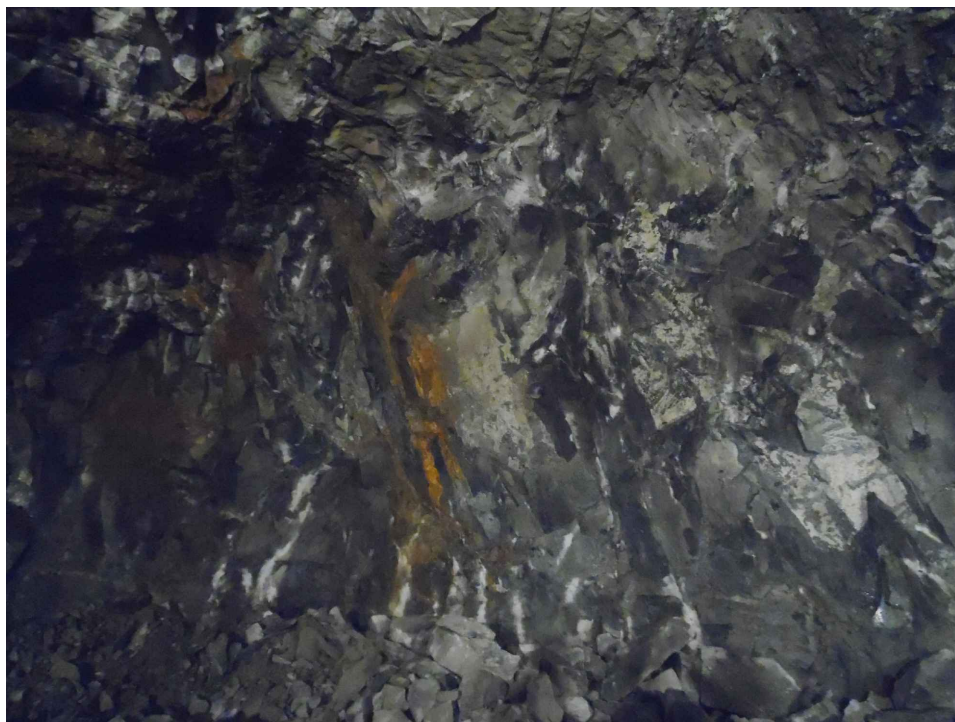
Abóbada



Frente de Escavação

Legenda:

Dicalase	Zonamento W/F	Diacassamento inclinado	Qz	Quartzitos
Falha	Filão de Quartzo	Diacassamento vertical/subvertical	Xi	Xistos Cinzentos
Limite Geológico	Ponto de Água	W.; F. Critérios de alteração e fraturação (SIMR)	Ms	Metassedimentos
	X limin			



**FICHA DE LEVANTAMENTO GEOLOGICO-GEOMECANICO
TÉCNICA DA AMOSTRAGEM LINEAR (Scanline)**

Orientação
do Perfil: N130W
da "Scanline": N130W
Altura da "scanline" ao solo (m): 0

Data: 30-04-2015
Localização: Poente Sul
pk: 15+864,00

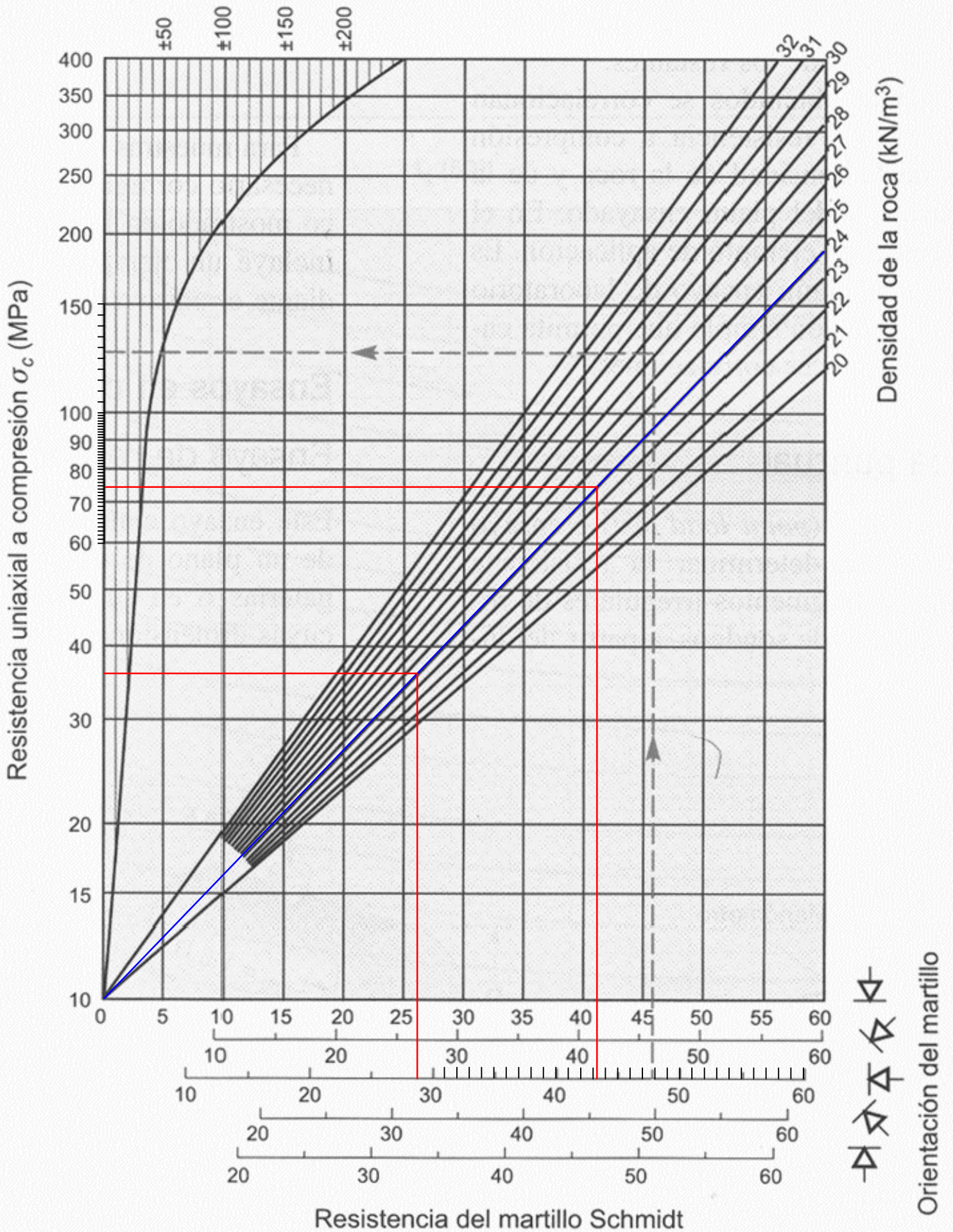
Parâmetros geológico-geotécnicos e geomecânicos segundo ISRM (1978, 1981, 2007), GSE (1995)

Descontinuidade nº	Distância à origem (m) D	Litologia	Grau de alteração		Tipo de descontinuidade e (F-falha; D-díclase)	Abertura (mm)	Grau de fraturação (Fracture Intercept)		Semi-comprimento (L) (m)	Terminação T	Curvatura C	Rugosidade R	Tipo de enchimento	Presença de água	Observações		
			Classificação	Valor			Valor	Classificação								Acima da Scanline	Abaixo da Scanline
1	1.00	Metassedimentos *	W2	Ligeiramente alterada	D	0.5	Fechada	60.00	F3	7.05	0.00	D	C,1	O,2	Qtz	S	
2	1.40	Metassedimentos *	W2	Ligeiramente alterada	D	0.5	Fechada	40.00	F3	6.40	0.00	D	C,1	O,2	Qtz	S	
3	1.80	Metassedimentos *	W2	Ligeiramente alterada	D	0.5	Fechada	25.00	F3	5.65	0.00	D	C,1	O,2	Qtz	S	
4	2.35	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	1	Aberta	180.00	F2	11.10	0.00	O	C,1	O,2	SP	S	
5	3.95	Metassedimentos *	W3	Moderadamente alterada	D	1	Aberta	100.00	F2	9.60	0.00	O	C,1	O,2	SP	H	
6	5.20	Metassedimentos *	W3	Moderadamente alterada	D	1	Aberta	25.00	F3	8.50	0.00	O	C,1	P,2	AM	H	Oxidação das paredes
7	5.65	Metassedimentos *	W3	Moderadamente alterada	D	1	Aberta	10.00	F4	8.80	0.00	O	C,1	P,2	AM	H	Oxidação das paredes
8	6.00	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	1	Aberta	20.00	F4	9.15	0.00	O	C,1	P,2	AM	H	Oxidação das paredes
9	6.40	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	0.1	Fechada	60.00	F3	9.80	0.00	O	C,1	O,2	Qtz	S	
10	6.00	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	1	Aberta	100.00	F2	6.40	0.00	O	C,1	O,2	SP	S	
11	8.75	Metassedimentos *	W2	Ligeiramente alterada	D	0.1	Fechada	80.00	F2	10.00	0.00	O	C,1	O,2	SP	H	
12	9.75	Metassedimentos *	W2	Ligeiramente alterada	D	0.1	Fechada	60.00	F3	9.90	0.00	O	C,1	O,2	SP	H	
13	11.80	Metassedimentos *	W2	Ligeiramente alterada	D	0.1	Fechada	85.00	F2	8.90	0.00	O	C,1	O,2	SP	S	
14		Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	1	Aberta	50.00	F3	5.00	0.00	D	C,2	O,2	SP	S	
15		Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	0.5	Fechada	85.00	F2	7.65	0.00	D	C,1	O,2	SP	S	
16		Metassedimentos *	W2	Ligeiramente alterada	D	1	Aberta	70.00	F2	5.15	0.00	D	C,2	O,2	SP	S	
17	Hasteal	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	0.1	Fechada	100.00	F2	6.90	0.00	O	C,1	O,2	SP	S	
18	Hasteal	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	0.1	Fechada	65.00	F2	7.05	0.00	O	C,1	O,2	SP	S	
19	Hasteal	Metassedimentos *	W2	Ligeiramente alterada	D	0.1	Fechada	95.00	F2	5.90	0.00	O	C,1	O,2	SP	S	
20	Hasteal	Metassedimentos *	W3	Moderadamente alterada	D	1.5	Aberta	30.00	F3	3.65	0.00	O	C,1	P,2	AM	F	Oxidação das paredes
21	Hasteal	Metassedimentos *	W3	Moderadamente alterada	D	1	Aberta	190.00	F2	5.05	0.00	O	C,1	O,2	SP	S	
22	Hasteal	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	0.1	Fechada	200.00	F2	3.60	0.00	D	C,1	O,2	SP	S	
23	Hasteal	Metassedimentos *	W1	Sã ou não alterada	D	0.1	Fechada	120.00	F2	3.90	0.00	D	C,1	O,2	SP	S	

Anexo 5

Exemplo de ficha de levantamento geomecânico do martelo de Schmidt (tipo L) em frentes de escavação subterrâneas (túnel do Marão) - Túnel Poente Norte, pk 15+611,50

Dispersión media de valores de resistencia para la mayoría de rocas (MPa)



Resistencia uniaxial a compresión σ_c (MPa)

Densidad de la roca (kN/m^3)

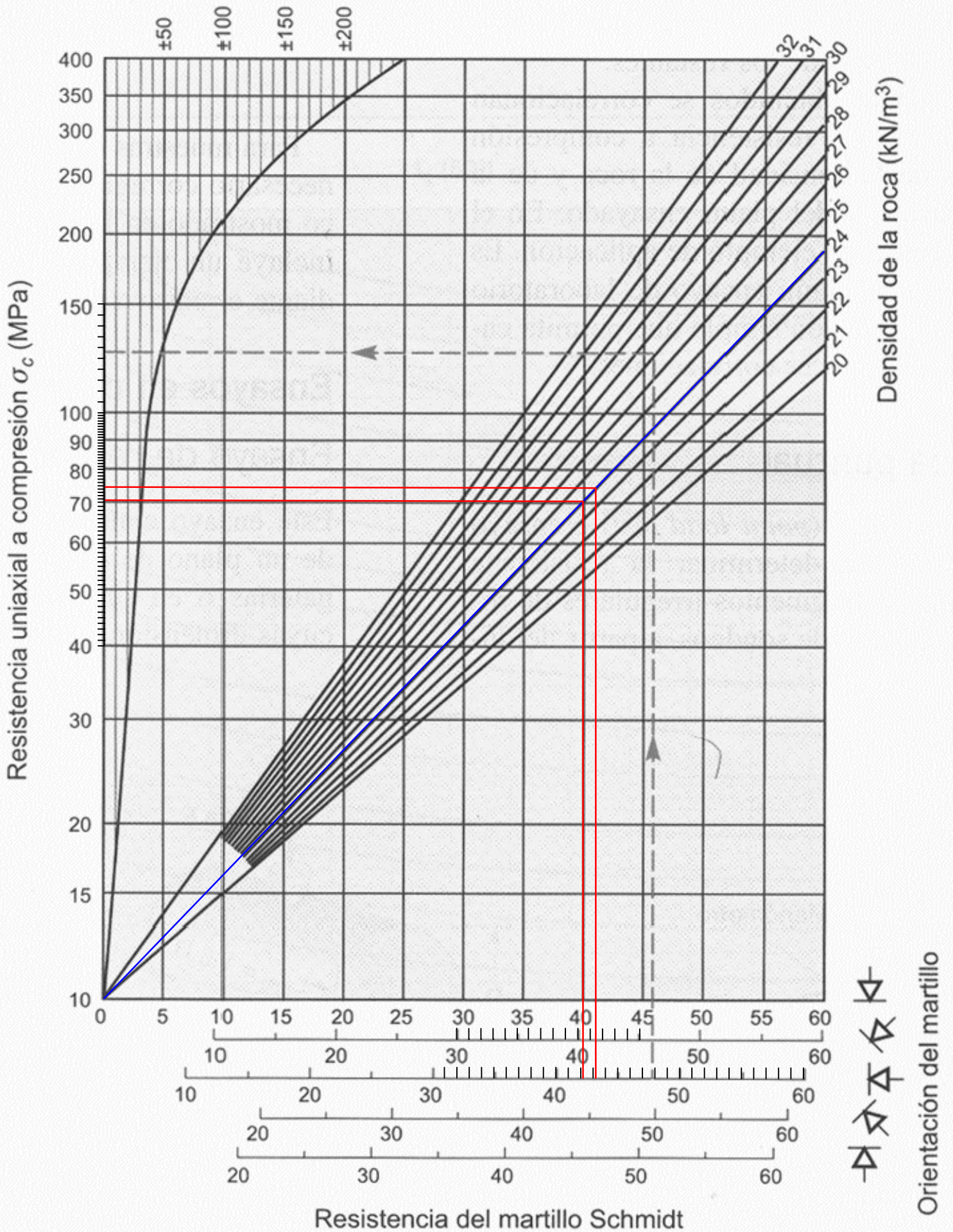
Orientación del martillo

Resistencia del martillo Schmidt

Anexo 6

Exemplo de ficha de levantamento geomecânico do martelo de Schmidt (tipo L) em frentes de escavação subterrâneas (túnel do Marão) - Túnel Poente Norte, pk 15+719,00

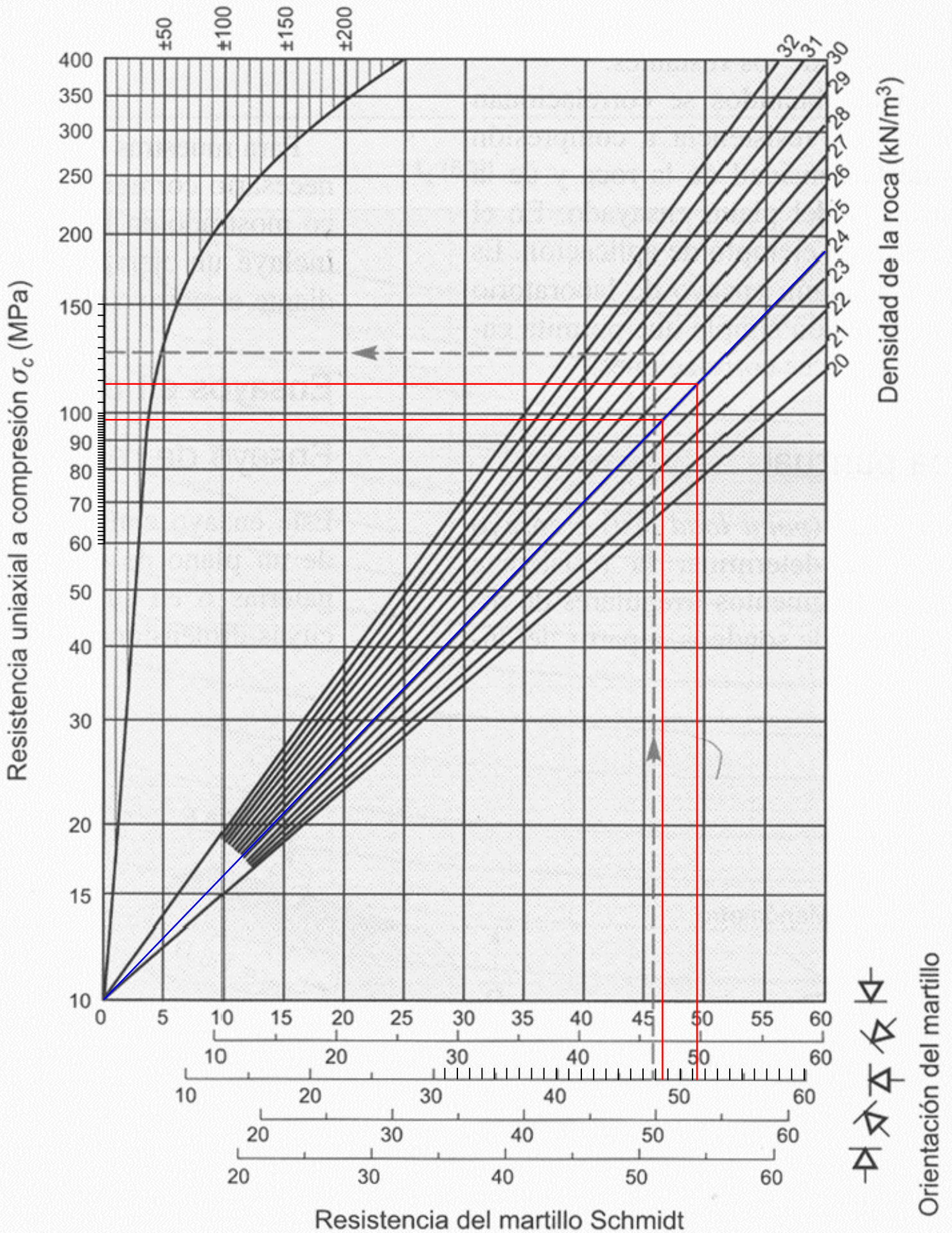
Dispersión media de valores de resistencia para la mayoría de rocas (MPa)



Anexo 7

Exemplo de ficha de levantamento geomecânico do martelo de Schmidt (tipo L) em frentes de escavação subterrâneas (túnel do Marão) - Túnel Poente Sul, pk 15+737,00

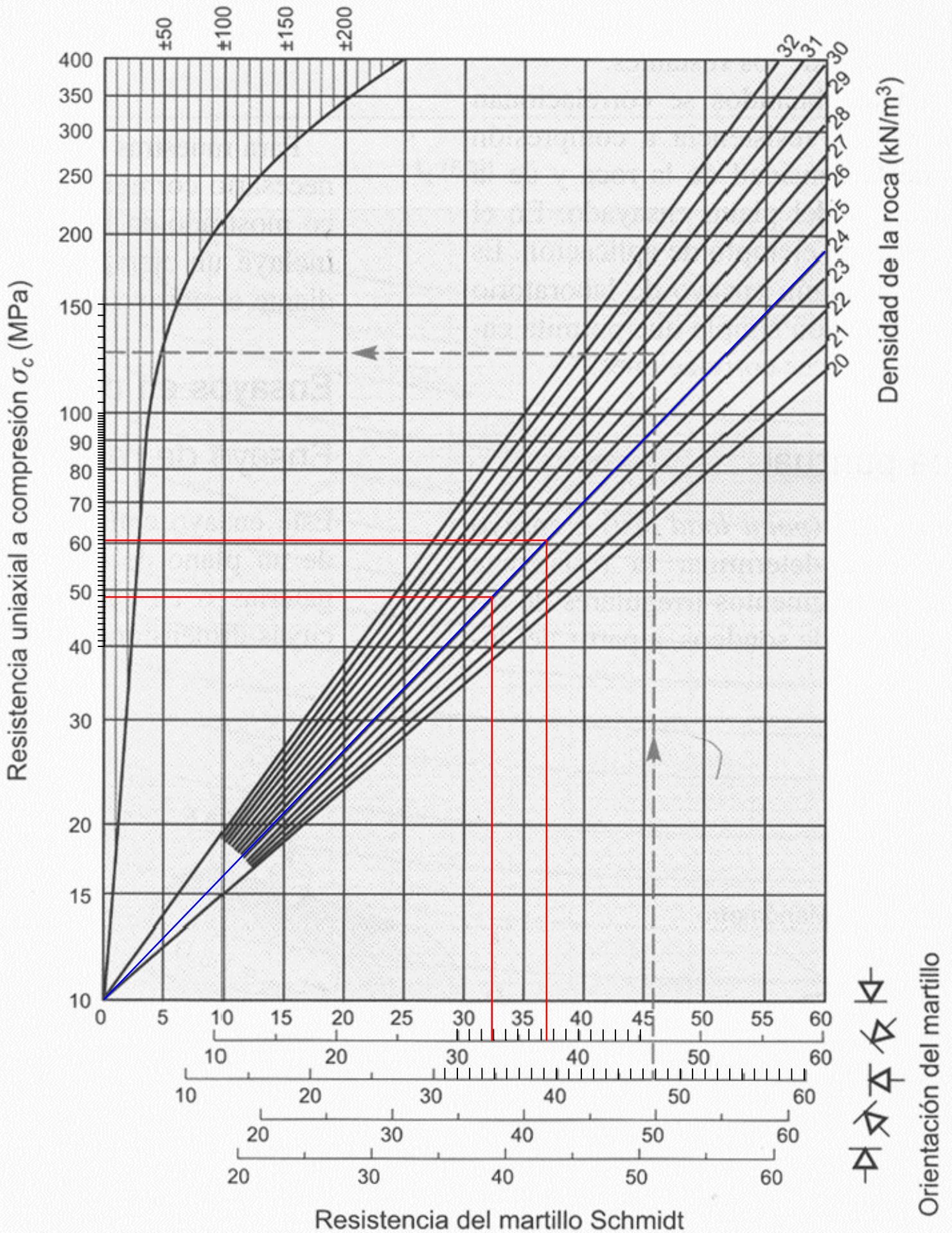
Dispersión media de valores de resistencia para la mayoría de rocas (MPa)



Anexo 8

Exemplo de ficha de levantamento geomecânico do martelo de Schmidt (tipo L) em frentes de escavação subterrâneas (túnel do Marão) - Túnel Poente Sul, pk 15+864,00

Dispersión media de valores de resistencia para la mayoría de rocas (MPa)



Anexo 9

Aspectos gerais da empreitada do túnel do Marão



