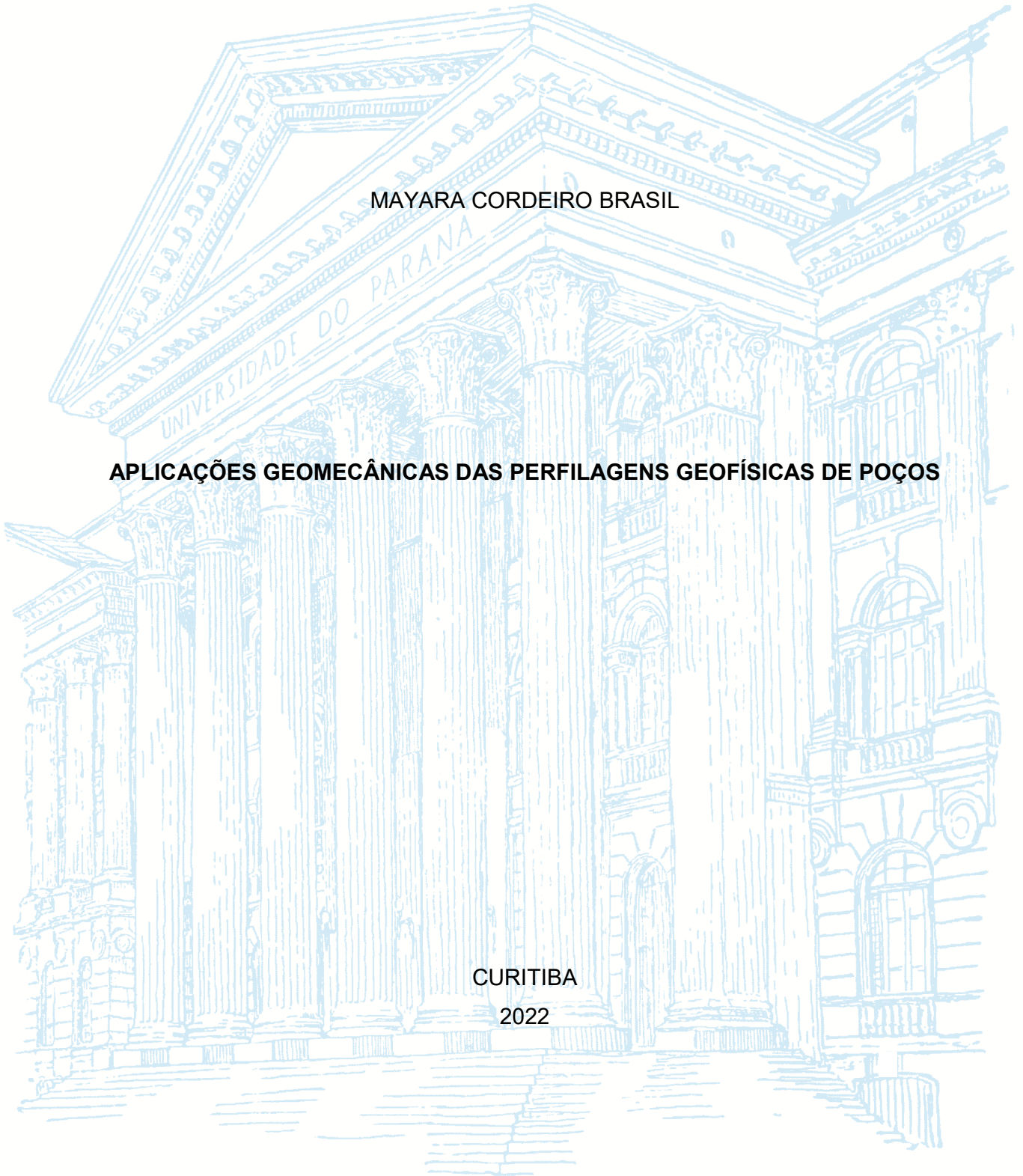


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA

MAYARA CORDEIRO BRASIL

APLICAÇÕES GEOMECÂNICAS DAS PERFILAGENS GEOFÍSICAS DE POÇOS

CURITIBA
2022



MAYARA CORDEIRO BRASIL

APLICAÇÕES GEOMECÂNICAS DAS PERFILAGENS GEOFÍSICAS DE POÇOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do grau de geóloga no curso de Bacharelado em Geologia, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Professor Dr. rer. nat. Germán Vinueza.

Coorientadora: Professora Dra. Alessandra de Barros e Silva Bongnolo.

CURITIBA

2022

AGRADECIMENTOS

Naturalmente um trabalho de conclusão de curso demanda tempo, energia e dedicação. Realizá-lo em meio a uma pandemia, tornou-se ainda mais desafiador e, com certeza, isso não seria possível sem todo o apoio que recebi neste caminho.

Agradeço primeiramente ao meu orientador Germán Vinueza, pela inquestionável atenção, empenho e estímulo desde a definição do tema deste TCC e também por compreender os alunos e alunas como indivíduos complexos, para além da visão extremamente produtivista impregnada na academia.

Agradeço também à coorientadora Alessandra de Barros e Silva Bongioiolo, pelo interesse, entusiasmo e disponibilidade para ajudar em todos os momentos. Ao professor Gustavo Barbosa Athayde, pelo tempo despendido em reuniões e pelos materiais e manuais fornecidos. Ao geólogo José Roberto de Góis pelos livros emprestados.

À minha mãe e meu pai por serem raízes tão nutritivas, por sempre estarem presentes me dando todo o apoio e suporte do mundo e por serem os maiores torcedores e impulsionadores do meu sucesso. À minha irmã, geóloga Mariany Nayara Cordeiro Brasil, por me apresentar o mundo apaixonante da Geologia, por ser a minha grande inspiração e maior exemplo de profissional.

Ao meu querido amigo Guilherme Machado do Valle, por vivenciar comigo cada momento envolvido neste TCC e por tudo o que aprendemos e crescemos juntos ao longo da empreitada nada fácil e nada curta que foi a graduação, com certeza foi mais fácil porque estávamos juntos.

Ao meu grande amor Marina Persegani, pela assertividade nas palavras de conforto em momentos cruciais deste percurso, por me incentivar a nunca desistir dos meus objetivos e por compartilhar a vida comigo.

E por último, mas não menos importante, ao CEGEP, por me trazer tantos aprendizados e tantos amigos que considero como uma família, Nathalia Krause, Arthur Ortiz, Júlio Brita, Amanda Barros, Nicole Carolina dos Santos, Daniela Zolet, Luiz Felipe Elicker, Amanda Colasso, Leomara, Karen Ramos, Gabriel Ruviano, Luiza Serenato, Eduarda Postol, Rafael Jun, Maciel Rudnick, Agda, Giordano, Johana Guatura, Camila Oliveira, Caroline Haluch, Barbara Iatzaki, Gabrielle Poi, Maiara Fabri, Gabriela Velásquez, Flávia Lanaro, Lívia Passos, Laís Camargo de Novaes, Victor Dorneles, Giovana Aizona, Luís Guilherme Silva, Leonardo Larroza,

Gabriella Rissardo, Bianca Brehm, Wagner Biscaia, Giovana Bernardes e Jhonathan Dassoler, cada troca e momento compartilhado me fortaleceram irreversivelmente.

“Não sou pedra, mas posso endurecer...”
(Francisco, El Hombre – Calor da rua)

*“...everything still turns to gold
And if you listen very hard
The tune will come to you, at last
When all are one and one is all
To be a rock and not to roll”*
(Led Zeppelin - Stairway To Heaven)

RESUMO

Maciços rochosos são definidos como o meio *in situ* composto por rocha intacta, estruturas e descontinuidades de diferentes tipos. Desde o final do século XIX, estes maciços são classificados quanto ao seu comportamento geomecânico e, com o avanço dos anos, foram construídos e consolidados sistemas qualitativos e quantitativos voltados para estas classificações. Desde então, estes sistemas passam por constantes avanços, buscando se adequar as necessidades vigentes, facilitar seu uso, poupar tempo e gastos, na medida do possível. Métodos indiretos para a aquisição de dados podem, muitas vezes, colaborar neste processo e, por isso, o objetivo deste estudo foi contribuir para o conhecimento referente à aquisição dos parâmetros necessários nos sistemas de classificação geomecânica mais utilizados (RMR, Q e GSI), por meio das perfilagens geofísicas acústica televisionada, sônica e *flowmeter* em poços. Para isso, foram empregadas as revisões narrativa e integrativa da bibliografia que permitiram identificar que, dentre as sondagens analisadas, a mais eficaz e promissora foi a sondagem acústica televisionada que pode adquirir até 8 dos 12 parâmetros necessários para o sistema RMR, 3 dos 6 para o sistema Q e 2 dos 2 para o sistema GSI. A sondagem sônica apresenta uma clara limitação no que concerne a orientação das descontinuidades e com isso, quase todos os parâmetros ligados às estas estruturas são comprometidos. Mesmo assim, a sondagem sônica apresenta bons resultados, com uma taxa de aquisição de 42% dos parâmetros necessários no sistema RMR, 33% no sistema Q e 0% no sistema GSI, devido à limitação mencionada. A sondagem *flowmeter*, por outro lado, só fornece dados relacionados à presença de água e, por isso, foi considerada como apenas uma técnica complementar. De todo modo, recomenda-se que os métodos indiretos sejam, na medida do possível, balizados com métodos diretos, e/ou correlacionados entre si para uma maior robustez e confiabilidade das informações obtidas. .

Palavras-chave: Geotecnia. Geofísica. Classificações geomecânicas. Perfilagem de poços.

ABSTRACT

Rock masses are defined as the in-situ environment which is made up of intact rock, structures, and different types of discontinuities. Since the end of the 19th century, these rock masses have been classified according to their geomechanical behavior and, over the years, quantitative systems aimed at these classifications were created and consolidated. Since then, these systems have been progressing constantly to meet different requirements, facilitate its use and save time and expenses, as far as possible. Indirect methods for data acquisition can often collaborate to this purpose, therefore, the aim of this study was to contribute to the knowledge of the acquisition of the necessary parameters in the most used geomechanical classification systems (RMR, Q and GSI) using the following well logging techniques: acoustic televiewer, full wave form sonic probe and heat-pulse flowmeter probe. To this end, narrative and integrative reviews of the bibliography have been used, allowing to identify that, among the analyzed probes, the most effective and promising for the acquisition of data has been the acoustic televiewer logging, that managed to get 8 of the 12 parameters for the RMR system, 3 of the 6 for the Q system and 2 of the 2 for the GSI system; sonic probe, on the other hand, has some disadvantages because of its limitations regarding the orientation of the discontinuities and thereat, since almost all the parameters linked to these structures are spoiled. Even so, it reports good results, because it has an acquisition rate of 42% of the necessary parameters in the RMR system, 33% in the Q system and 0% in the GSI system, due to the mentioned factor. Flowmeter sounding, in contrast, only provides data related to water and, therefore, it is a complementary technique. In any case, it is recommended that indirect methods be applied with direct methods, and/or even correlated with each other to generate more robust and reliable data.

Keywords: Geotechnics. Geophysics. Geomechanical classifications. Well profiling.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - ESTRUTURAS EXISTENTES NOS MACIÇOS ROCHOSOS..... | 6 |
| FIGURA 2 - SONDAS TÍPICAS DAS PERFILAGENS A) ACÚSTICA TELEVISIONADA B) SÔNICA E C) <i>FLOWMETER</i> | 9 |
| FIGURA 3 - CORRELAÇÕES OBTIDAS PARA ARENITOS DE DIFERENTES AUTORES E LOCALIDADES | 18 |
| FIGURA 4 - A) PERFIL TÍPICO GERADO POR SONDA ACÚSTICA TELEVISIONADA; B) PERFIL TÍPICO GERADO POR SONDA SÔNICA | 20 |
| FIGURA 5 - CORRELAÇÃO ENTRE O RQD E O ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES | 22 |
| FIGURA 6 - CORRELAÇÃO ENTRE RQD E JV | 23 |
| FIGURA 7 - RELAÇÃO ENTRE O GRAU DE RUGOSIDADE E O ÍNDICE JRC | 25 |
| FIGURA 8 - PERFIL TÍPICO GERADO POR SONDA <i>FLOWMETER</i> | 28 |
| FIGURA 9 - DETERMINAÇÃO DE JN A PARTIR DO NÚMERO DE FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES | 30 |
| FIGURA 10 - DIAGRAMAS ESTRUTURAIS REPRESENTANDO OS PÓLOS DOS PLANOS DAS DESCONTINUIDADES CARACTERIZADAS PELA SONDA HRAT | 31 |
| FIGURA 11 - RUGOSIDADE DAS DESCONTINUIDADES EM ESCALA MAIOR E MENOR..... | 31 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| QUADRO 1 - EQUIPAMENTOS DE PERFILAGEM GEOFÍSICA DE POÇOS QUE SERÃO ESTUDADOS E SUAS RESPECTIVAS ESPECIFICIDADES | 7 |
| QUADRO 2 - SÍNTESE DOS PARÂMETROS QUE PODEM SER OBTIDOS COM AS SONDAJENS DE POÇOS ACÚSTICA TELEVISIONADA, SÔNICA E <i>FLOWMETER</i> | 15 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO FINAL DO MACIÇO ROCHOSO DE ACORDO COM SISTEMA RMR | 11 |
| TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO FINAL DO MACIÇO ROCHOSO DE ACORDO COM SISTEMA Q..... | 12 |
| TABELA 3 - EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO ENTRE VP E UCS DE DIFERENTES AUTORES..... | 16 |
| TABELA 4 - MÉTODOS INDIRETOS DE OBTENÇÃO DO RQD..... | 21 |
| TABELA 5 - CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO COM BASE EM SEU GRAU DE ALTERAÇÃO | 26 |
| TABELA 6 - DESCRIÇÃO TÍPICA DA ALTERAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES EM ROCHA DURA..... | 32 |
| TABELA 7 - CONDIÇÃO DE AFLUÊNCIA E PRESSÃO DE ÁGUA | 33 |
| TABELA 8 - CONTAGEM DOS PARÂMETROS NECESSÁRIOS EM CADA CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA E OS OBTIDOS NAS SONDAJENS GEOFÍSICAS | 37 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 3 |
| 1.1 OBJETIVOS | 4 |
| 1.1.1 Objetivos específicos | 4 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 4 |
| 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE AS CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS E AS CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS MACIÇOS ROCHOSOS | 4 |
| 2.2 PERFILAGENS GEOFÍSICAS DE POÇOS | 6 |
| 2.2.1 Perfilagem acústica televisionada | 7 |
| 2.2.2 Perfilagem sônica | 8 |
| 2.2.3 Perfilagem de fluxo | 9 |
| 2.3 CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS | 10 |
| 2.3.1 Sistema de classificação RMR | 10 |
| 2.3.2 Sistema de classificação Q..... | 11 |
| 2.3.4 Sistema de classificação GSI | 12 |
| 3 METODOLOGIA | 13 |
| 4 RESULTADOS | 15 |
| 4.1 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO RMR..... | 16 |
| 4.1.1 Resistência do material rochoso intacto ou resistência a compressão axial 16 | |
| 4.1.2. Espaçamento entre as descontinuidades | 18 |
| 4.1.3 RQD | 21 |
| 4.1.4. Condições das descontinuidades | 23 |
| 4.1.5. Presença de água..... | 27 |
| 4.1.6 Fator de ajuste: orientação das descontinuidades..... | 29 |
| 4.2 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO Q | 29 |
| 4.2.1 Condições de compartimentação do maciço (Jn) | 29 |
| 4.2.2 Rugosidade das descontinuidades (Jr)..... | 31 |
| 4.2.3 Grau de alteração das descontinuidades (Ja) | 32 |
| 4.2.4 Fator de redução de água (Jw)..... | 33 |
| 4.2.5 Estado de tensão do maciço (SRF) | 33 |
| 4.3 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GSI..... | 34 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3.1 | Grau de fraturamento | 34 |
| 4.3.2 | Condições superficiais das fraturas | 35 |
| 5 | DISCUSSÕES | 35 |
| 5.1 | PONDERAÇÃO SOBRE O USO DE MÉTODOS INDIRETOS NA OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMECÂNICOS | 35 |
| 5.2 | COMPARAÇÃO QUALITATIVA ENTRE AS SONDAGENS GEOFÍSICAS | 36 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 37 |
| 6.1 | RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 38 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 39 |
| | ANEXO 1 – TABELAS DE REFERÊNCIA PARA A DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA RMR | 43 |
| | ANEXO 2 – TABELAS DE REFERÊNCIA PARA A DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA Q | 47 |
| | ANEXO 3 – TABELAS DE REFERÊNCIA PARA A DEFINIÇÃO DO GSI | 52 |
| | ANEXO 4 – TABELAS DE REFERÊNCIA PARA A DEFINIÇÃO DO RQD | 53 |

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos têm sido desenvolvidos desde 1879, inicialmente com objetivo único de contribuir nas tomadas de decisões em projetos de engenharia civil. Atualmente, essas classificações também são empregadas em outras áreas, como no estudo de encostas e cavidades naturais. Os principais benefícios destas classificações consistem em: i) Melhorar a qualidade das investigações *in situ*, objetivando a entrada de dados mínimos como parâmetros de classificação; ii) Fornecer informações quantitativas para fins de projeto, e prover parâmetros de entrada para modelos analíticos e computacionais que permitam a construção do modelo geomecânico do maciço; iii) Permitir uma melhor avaliação de engenharia e tornar a comunicação geológica-geotécnica mais eficaz em um projeto (Ávila, 2012).

Nas últimas décadas, concomitantemente à ascensão tecnológica, houve muitos avanços nas caracterizações geomecânicas. Com isso, foram estabelecidos diferentes sistemas de classificação de maciços rochosos que dão ênfase a parâmetros distintos de acordo com as necessidades de cada caso. Contudo, recomenda-se que pelo menos dois métodos sejam utilizados em qualquer local durante os estágios iniciais de um projeto (Hoek *et al.*, 1995).

Além disso, com os desastres e tragédias ambientais cada vez mais frequentes nos dias atuais, urge a necessidade crescente de aprimorar os métodos de controle de estabilidade geotécnica, torná-los mais rápidos e eficazes, e desenvolver novos mecanismos que unam ferramentas diversas. Desta forma, existe um constante aperfeiçoamento dos sistemas de classificação geomecânica existentes.

Assim sendo, o presente estudo busca encontrar aplicações geotécnicas de equipamentos de perfilagem geofísica – sônica, televisionamento acústico e *flowmeter* – de poços, majoritariamente aplicados na área da hidrogeologia, por meio da revisão bibliográfica de trabalhos que utilizaram a abordagem das classificações geomecânicas de maciços rochosos e realizaram a aplicação destes equipamentos. Tais equipamentos podem trazer informações em relação à densidade da rocha, grau de fraturamento, disposição e orientação de descontinuidades, presença ou ausência de água, entre outros fatores que são

fundamentais para as classificações geomecânicas de maciços rochosos. Desta maneira, o estudo pode contribuir positivamente em melhorias na obtenção dos parâmetros utilizados nestas classificações, principalmente em relação ao ganho de tempo e redução de recursos despendidos em ensaios laboratoriais.

1.1 OBJETIVOS

O propósito central desta monografia é agregar conhecimento sobre a aplicabilidade dos dados obtidos em perfilagens geofísicas de poços ou furos de sondagem nas classificações geomecânicas de maciços rochosos de mais ampla utilização.

1.1.1 Objetivos específicos

- I. Identificar e caracterizar os dados obtidos com as perfilagens: acústica televisionada, sônica e *flowmeter*;
- II. Investigar e avaliar a aplicabilidade destes dados na determinação dos parâmetros necessários para a utilização dos sistemas de classificação geomecânica RMR, Q e GSI;
- III. Compilar e comparar as informações extraídas da bibliografia analisada.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE AS CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS E AS CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS MACIÇOS ROCHOSOS

As classificações geomecânicas buscam quantificar numericamente características específicas do maciço rochoso com o intuito de estabelecer a qualidade do mesmo para um determinado fim. Com a utilização delas, é possível planejar ângulo de taludes, largura de túneis e galerias, tipo e dimensionamento de suportes, determinar o fator de segurança em obras civis, escolher adequadamente métodos de lavras, analisar a ocorrência de subsidências e fragmentação do maciço rochoso (Brady e Brown, 2006).

De acordo com Brady e Brown (2006), o maciço rochoso é o meio *in situ* que contém planos de acamamento, falhas, juntas, dobramentos e outras características estruturais, além da rocha intacta. Fora a parte geométrica e geológica, o maciço rochoso incorpora a presença de água, tensões e está sujeito a fatores intempéricos que influenciam diretamente o seu comportamento (Fiori, 2015).

Hoek e Brown (1980) sugerem um método de reconhecimento do maciço rochoso que deve ser realizado previamente à classificação geomecânica, este método é dividido nas seguintes etapas:

I. Caracterização geológica do maciço: descrições locais e regionais, abordando as principais características litológicas, estruturais e intempéricas.

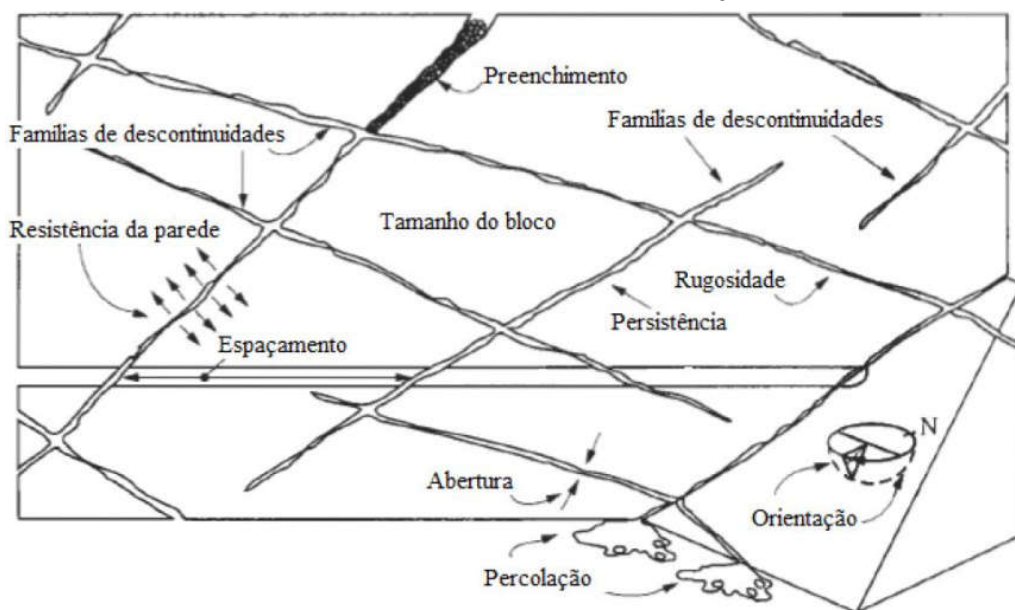
II. Caracterização estrutural do maciço: descrições e medições de espessura de camadas, espaçamento entre fraturas, rugosidade das descontinuidades, direção e mergulho das descontinuidades.

III. Caracterização mecânica: resistência ao cisalhamento, resistência à compressão e ângulo de atrito das descontinuidades.

No que se refere à caracterização estrutural do maciço, a descrição das descontinuidades é imprescindível, pois estas representam planos de fraqueza. As descontinuidades são definidas por Priest (1993) como qualquer quebra mecânica ou fratura presente num maciço rochoso e segundo ISRM (1981) suas principais características com implicações no comportamento geotécnico são a orientação, o espaçamento, a persistência, a rugosidade, o preenchimento e a abertura (FIGURA 1). Além destas, devem ser considerados a influência da água e o estado de alteração do maciço (Santos, 2015).

Para que essas caracterizações sejam feitas, uma série de parâmetros são necessários e, para adquiri-los, comumente são realizadas análises empíricas, ensaios laboratoriais e, de forma menos usual, utilizados métodos indiretos, como as perfilagens geofísicas, foco deste estudo.

FIGURA 1 - ESTRUTURAS EXISTENTES NOS MACIÇOS ROCHOSOS



FONTE: Santos, 2015 (adaptado de ISRM, 1981).

2.2 PERFILAGENS GEOFÍSICAS DE POÇOS

Potencialmente, qualquer técnica de levantamento geofísico pode ser empregada em perfilações de poços, porém os métodos mais utilizados são os de resistividade elétrica, indução eletromagnética, potencial espontâneo, radioatividade natural ou induzida, velocidade e temperatura sônica. Os estudos geológicos baseados nestas perfilações geralmente são voltados para a exploração de hidrocarbonetos e água subterrânea e necessitam da correlação entre vários poços para uma compreensão efetiva do maciço rochoso, sendo que estes poços usualmente precisam estar frescos ou não revestidos (Kearey *et al.*, 2009).

De forma geral, a instrumentação necessária para a perfilação de um poço consiste em um tubo de metal cilíndrico, ou sonda, que é suspensa no poço por um cabo blindado e baixada até a base da seção a ser registrada. O registro é feito de forma analógica ou digital enquanto a sonda é içada de volta a superfície. A instrumentação de superfície inclui registradores, polias de cabo, guinchos e, dependendo do tipo de perfilação, a instalação é realizada em um caminhão de aquisição especial próximo à boca do poço (Kearey *et al.*, 2009).

Neste tópico são detalhados os princípios de operação dos equipamentos mais representativos dos métodos de perfilagem em foco neste estudo, sumarizados no QUADRO 1.

QUADRO 1 - EQUIPAMENTOS DE PERFILAGEM GEOFÍSICA DE POÇOS QUE SERÃO ESTUDADOS E SUAS RESPECTIVAS ESPECIFICIDADES

| | EQUIPAMENTO | | |
|---------------------------|--|---|---|
| | High Resolution Acoustic Televiwer (HRAT) | Full Waveform Sonic Probe | Heat-Pulse Flowmeter Probe (HPFS) |
| Tipo de perfilagem | Televisionamento acústico | Sônico | Fluxo |
| Propriedade física medida | Impedância acústica: diferença de tempo na emissão e na recepção de uma onda acústica ultrassônica (0,5-1,5 MHz) | Impedância acústica: diferença de tempo na emissão e na recepção de uma onda acústica de alta frequência (+/- 23 KHz) | Velocidade e temperatura de um pulso de calor |
| Informação obtida | <ul style="list-style-type: none"> • Imagem qualitativa da parede do poço • Geometria, disposição, condições e orientação de descontinuidades <ul style="list-style-type: none"> • Caracterização quantitativa das zonas de fraturas | <ul style="list-style-type: none"> • Identificação da espessura de litologias • Correção da velocidade sísmica • Medição de porosidade intergranular • Resistência e elasticidade • Caracterização qualitativa das zonas de fraturas <ul style="list-style-type: none"> • Quantidade de fluidos • Estimativa de densidade | <ul style="list-style-type: none"> • Medição da vazão nos fluidos do poço • Detecção de horizontes permeáveis <ul style="list-style-type: none"> • Localização de vazamentos no invólucro |

FONTE: A autora (2022). Base de dados: Robertson Geo (2020a, 2020b, 2020c).

2.2.1 Perfilagem acústica televisionada

A perfilagem acústica televisionada é obtida a partir da medição da amplitude e do tempo de trânsito das reflexões de pulsos de ondas acústicas na ordem do ultrassom (0,5-1,5 MHz) gerados por um ressonador piezoelétrico (FIGURA 2A). Esse ressonador, ou sonda, converte energia elétrica em energia mecânica na forma de pulsos sonoros que são transmitidos para a parede do poço através de um óleo no qual o ressonador fica imerso. A energia refletida é captada pelo mesmo transdutor e uma imagem da parede do poço é produzida movendo a sonda ao longo do eixo do poço enquanto ela faz a varredura radialmente. A resistência que o material opõe à passagem da onda sonora é denominada “impedância acústica” (Robertson Geo, 2020a).

Além disso, existe um magnetômetro e inclinômetros ortogonais acoplados ao equipamento que detectam o campo magnético da Terra e a inclinação do poço respectivamente. Dessa forma, o resultado final é georreferenciado (Robertson Geo, 2020a).

O exemplo de equipamento mais representativo deste tipo de perfilagem é o *High Resolution Acoustic Televiewer* (HRAT) (FIGURA 2A) e as principais informações com ele obtidas são a imagem qualitativa da parede do poço, a geometria, disposição, condições e orientação das descontinuidades e a caracterização quantitativa das zonas de fraturas (QUADRO 1) (Robertson Geo, 2020a).

É de extrema importância a centralização do equipamento antes do início do imageamento na profundidade desejada, pois as propriedades do maciço são determinadas pelo tempo de trânsito e, se a ferramenta estiver descentralizada, esse tempo pode ser maior ou menor, a depender da região onde a ferramenta está mais próxima ou mais distante da parede do poço (Robertson Geo, 2020a).

2.2.2 Perfilagem sônica

O equipamento típico da perfilagem sônica é o *Full Waveform Sonic Probe* (FIGURA 2B) e seu objetivo é determinar as velocidades de onda de compressão e cisalhamento do maciço rochoso. Seus princípios operacionais são os mesmos dos descritos para o item de perfilagem acústica televisionada, firmado no conceito da impedância acústica, porém aqui o pulso elétrico emitido pelo ressonador é de alta voltagem, com uma frequência de aproximadamente 23 KHz (Robertson Geo, 2020b).

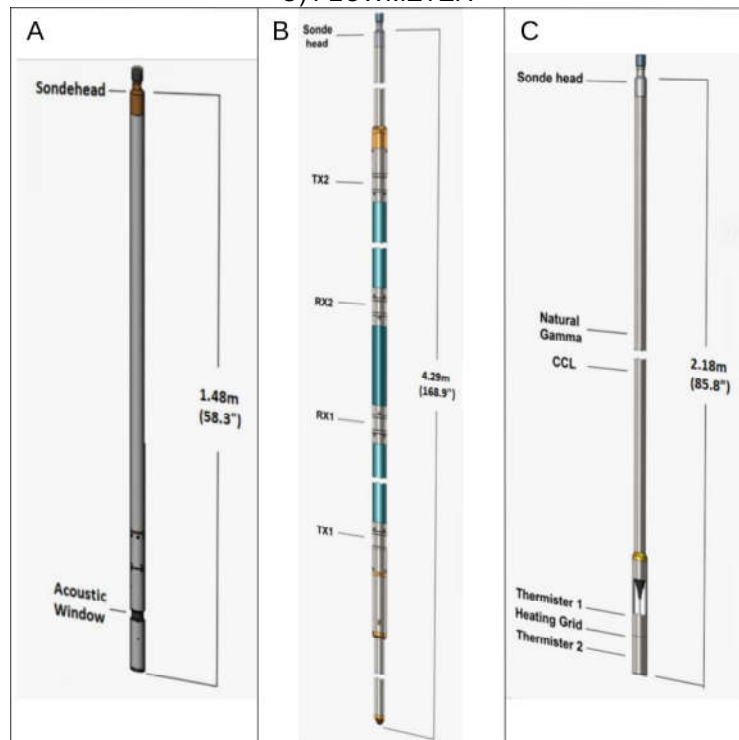
Com isso, os produtos obtidos por este equipamento tornam-se diferentes do anterior, aqui não se obtém um imageamento 3D da parede do poço e nem a geometria das descontinuidades, mas é possível identificar a espessura de litologias, corrigir a velocidade sísmica, medir a porosidade intergranular, a resistência e a elasticidade, caracterizar qualitativamente as zonas de fraturas, a quantidade de fluidos e estimar a densidade do maciço rochoso (QUADRO 1) (Robertson Geo, 2020b).

2.2.3 Perfilagem de fluxo

O fluxômetro de pulso de calor ou *flowmeter* é o equipamento que gera a perfilagem de fluxo e funciona de maneira bastante simples: é criado um pulso de calor que viaja pelo fluido do poço por uma distância predeterminada até um detector, onde o tempo gasto para sua chegada é registrado (velocidade = distância / tempo) e a dispersão de calor é inibida pela baixa condutividade de calor do fluido. Dessa forma, é calculada a velocidade do fluxo e a temperatura do mesmo, sendo que se a diferença de temperatura for positiva, o fluxo é para cima, enquanto se a mudança for negativa, o fluxo do poço é para baixo. Os registros são feitos com uma sonda estacionária (FIGURA 2C) no poço em intervalos regulares de profundidade gerando um perfil de velocidade ao longo do comprimento investigado (Robertson Geo, 2020c).

O equipamento característico deste tipo de perfilagem é o *Heat-Pulse Flowmeter Probe* (HPFS) (FIGURA 2C) e além do perfil de fluxo e velocidade, com ele é possível medir a vazão dos fluidos, detectar os horizontes permeáveis e localizar vazamentos de invólucro (QUADRO 1) (Robertson Geo, 2020c).

FIGURA 2 - SONDAS TÍPICAS DAS PERFILAGENS A) ACÚSTICA TELEVISIONADA B) SÔNICA E C) FLOWMETER



FONTE: A) Robertson Geo, 2020a, B) Robertson Geo, 2020b, C) Robertson Geo, 2020c

2.3 CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS

Os sistemas de classificação geomecânica aqui destacados são aqueles com maiores aplicações e mais amplamente utilizados.

2.3.1 Sistema de classificação RMR

Atualmente o *Rock Mass Rating* ou simplesmente RMR foi desenvolvido em 1973 por Bieniawski e passou por modificações pelo próprio autor nos anos de 1979 e 1989. Inicialmente seu objetivo era determinar a relação entre o vão livre de túneis e seu tempo de sustentação sem suporte, mas passou a ser utilizado também para estimar a coesão de atrito de maciços rochosos e hoje possui ampla aplicação em diversas obras de engenharia, se tornando o sistema de classificação geomecânica mais utilizado e difundido devido à combinação de fatores para sua obtenção.

Seis grupos de parâmetros são considerados para essa classificação:

- I. Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
- II. Índice RQD (*Rock Quality Designation*);
- III. Espaçamentos entre as descontinuidades;
- IV. Condições das descontinuidades;
- V. Condições de percolação da água subterrânea;
- VI. Orientação e mergulho das descontinuidades.

Para que esses parâmetros sejam analisados em campo e a classificação seja realizada de forma coerente, é necessário dividir o maciço rochoso em regiões estruturais de modo que as características sejam mais ou menos uniformes dentro de cada região. Na maioria dos casos, os limites que definirão estas regiões coincidem com as maiores estruturas geológicas no local, como falhas, diques, zonas de cisalhamento, entre outras (Bieniawski, 1989).

Após isso, são atribuídas notas para os cinco primeiros parâmetros citados anteriormente, conforme as tabelas do ANEXO 1. Estas notas recebem pesos diferentes (ANEXO 1), são somadas e passam por um fator de ajuste segundo a EQUAÇÃO 1. Este fator corresponde ao sexto parâmetro indicado previamente também tem uma tabela que orienta sua classificação (ANEXO 1), é qualitativo e representa a orientação das descontinuidades em relação à orientação da encosta ou obra civil como túneis, fundações ou taludes (Santos, 2015).

$$\text{RMR} = \Sigma(\text{pesos atribuídos a cada parâmetro}) \\ + \text{ajuste da orientação das descontinuidades}$$

EQUAÇÃO 1

O resultado final é um valor adimensional que qualifica o maciço rochoso de acordo com a TABELA 1.

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO FINAL DO MACIÇO ROCHOSO DE ACORDO COM SISTEMA RMR

| Somatório RMR | 100 - 81 | 80 - 61 | 60 - 41 | 40 - 21 | < 21 |
|--------------------|-----------|---------|----------|---------|-------------|
| Classe | I | II | III | IV | V |
| Descrição da rocha | Muito boa | Boa | Razoável | Pobre | Muito pobre |

FONTE: Adaptado de Bieniawski (1989).

2.3.2 Sistema de classificação Q

O sistema de classificação geomecânica *Tunnelling Quality Index* ou simplesmente Q é um sistema quantitativo concebido por Barton, Lien e Lunde em 1974 com aplicação inicial voltada para a projeção de suportes para túneis, porém atualmente é utilizado e adaptado para diversos outros fins (Bieniawski, 1989).

Esta classificação inclui aspectos tridimensionais da qualidade do maciço rochoso que são de fundamental importância na análise da estabilidade. Este sistema tem natureza quantitativa e requer a determinação dos seguintes fatores ponderados para sua definição:

- I. RQD;
- II. Número de famílias de descontinuidades (J_n);
- III. Índice de rugosidade das descontinuidades (J_r);
- IV. Grau de alteração das descontinuidades (J_a);
- V. Fator de redução de água (J_w);
- VI. Estado de tensão do maciço (SRF).

Tais parâmetros são definidos e calculados individualmente de acordo com as tabelas de referência do ANEXO 2 e, em seguida, são agrupados em três quocientes multiplicados entre si segundo a EQUAÇÃO 2 para fornecer o valor final do índice Q.

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

EQUAÇÃO 2

Onde:

$\frac{RQD}{J_n}$: está relacionado à geometria do maciço e representa uma medida aproximada do tamanho do bloco;

$\frac{J_r}{J_a}$: está relacionado com a resistência ao cisalhamento das descontinuidades;

$\frac{J_w}{SRF}$: é um fator relativo ao meio que incorpora poropressões, fluxo e descreve a tensão ativa no maciço. No cálculo de Q para obtenção de parâmetros de resistência e deformabilidade esse fator não é utilizado (Santos, 2015).

O resultado final de Q é plotado em escala logarítmica variando entre aproximadamente 0,001 e 1.000 abrangendo desde rochas brandas (*squeezing*) até maciços sãos, praticamente livre de descontinuidades (ABGE, 1998), ou seja, quanto mais alto for o valor encontrado, melhor será a qualidade do maciço, conforme demonstra a TABELA 2.

TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO FINAL DO MACIÇO ROCHOSO DE ACORDO COM SISTEMA Q

| Classe | Padrão geomecânico do maciço | Valores de Q |
|--------|------------------------------|---------------|
| IX | Péssimo | 0,0001 a 0,01 |
| VIII | Extremamente ruim | 0,01 a 0,1 |
| VII | Muito ruim | 0,1 a 1,0 |
| VI | Ruim | 1,0 a 4,0 |
| V | Regular | 4,0 a 10,0 |
| IV | Bom | 10,0 a 40,0 |
| III | Muito bom | 40,0 a 100,0 |
| II | Ótimo | 100,0 a 400,0 |
| I | Excelente | >400,0 |

FONTE: Adaptado de Barton *et al.* (1974).

2.3.4 Sistema de classificação GSI

O sistema de classificação GSI (*Geological Stress Index*) foi desenvolvido por Hoek e colaboradores em 1994 tendo como alvo os maciços rochosos

homogeneamente fraturados, unindo conceitos dos sistemas RMR e Q (Hoek, 1994). Marinos *et al.* (2007) apontam que o GSI atende a necessidade de confiabilidade dos dados de entrada nas classificações geomecânicas, particularmente dos dados voltados para análises numéricas com foco em projetar túneis, taludes ou fundações.

Esse sistema possibilita a estimativa das propriedades mecânicas do maciço rochoso, bem como a redução de sua força para diferentes condições geológicas (Wyllie Mah, 2004). O valor final do GSI se dá em um intervalo de valores obtido conforme a tabela exposta no ANEXO 3. Este intervalo é estabelecido com base na correlação entre o grau de fraturamento e as condições superficiais das fraturas.

3 METODOLOGIA

Existem três tipos de revisões de literatura consolidados na academia que são definidos de acordo com seu método de elaboração, a Revisão Narrativa, a Sistemática e a Integrativa.

A Revisão Narrativa tem um viés mais qualitativo em relação às demais, suas estratégias de investigação são abrangentes, o método de busca e análise da literatura é mais direcionado a uma problemática em específico e, por isso, muitas vezes não esgota todas as fontes de informações (UNESP, 2015).

A Revisão Sistemática, por sua vez, é metódica, explícita e passível de reprodução, ela busca testar hipóteses, levantar, reunir e comparar diversos estudos primários, além de sintetizá-los e avaliá-los criticamente. Portanto, é um tipo de revisão muito mais criteriosa em relação aos demais e produz uma avaliação extremamente quantitativa dos trabalhos anteriores (UNESP, 2015).

Já a Revisão Integrativa, como o próprio nome sugere, permite a integração de dados da literatura empírica e teórica com o objetivo de definir conceitos, identificar lacunas nas áreas de estudos, revisar teorias e analisar as metodologias dos estudos sobre um determinado tópico (UNESP, 2015).

A metodologia empregada nesta monografia une elementos da Revisão Narrativa e da Revisão Integrativa, pois apresenta um caráter qualitativo e abrangente na seleção da bibliografia, mas também busca integrar informações práticas e teóricas. Embora o estudo de trabalhos com diferentes frentes de

pesquisa possa complicar a análise, a diversidade no processo de amostragem tem o potencial de aprofundar e expandir as conclusões da revisão.

De todo modo, foram adotadas as seguintes etapas para a elaboração desta monografia:

I. Identificação do tema e definição do questionamento da pesquisa: assim como para qualquer estudo de revisão de literatura, é necessário que a questão e objetivo central estejam bem estabelecidos para que a busca pelas respostas seja eficiente. Nesta monografia, o questionamento central foi “é possível que as perfilagens geofísicas de poços (acústica televisionada, sônica e *flowmeter*) sejam aplicadas para a obtenção dos parâmetros utilizados nas classificações geomecânicas de maciços rochosos (RMR, Q e GSI)?”;

II. Localização dos estudos ou busca pela literatura: busca nas bases de dados (periódicos, anais de congressos, bibliotecas online, livros, entre outros) para a determinação dos estudos que serão incluídos na revisão;

III. Sumarização das informações: nesta etapa buscou-se organizar e sintetizar os dados de maneira concisa, filtrando-os para atender o objetivo do estudo;

IV. Avaliação dos dados: neste momento se aplicam os critérios para seleção da bibliografia a ser analisada. Para esta monografia, o foco foi para trabalhos voltados para as classificações geomecânicas, perfilagens geofísicas de poços, mais especificamente a acústica televisionada, sônica e *flowmeter*;

V. Interpretação dos resultados: com base na avaliação crítica dos estudos primários, neste estágio é realizada a comparação entre os mesmos, a identificação de conclusões e lacunas que permitam apontar sugestões para futuras pesquisas;

VI. Síntese do conhecimento: compilação dos dados e resultados obtidos através da construção de tabelas, gráficos e figuras em um documento conciso, neste caso a própria monografia.

Durante a seleção e busca dos estudos primários, partiu-se dos trabalhos mais abrangentes que serviram como base teórica para o entendimento do funcionamento dos sistemas de classificação geomecânica e das perfilagens geofísicas de poços até os trabalhos mais específicos que demonstram as aplicações diretas destes temas.

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos, após analisar os produtos gerados pelos equipamentos de perfilagem geofísica de poços em foco, foram agrupados de acordo com os sistemas de classificação geomecânica de interesse e sumarizados no QUADRO 2, onde “X” indica o parâmetro alcançado e “-” indica o parâmetro não atingido.

QUADRO 2 - SÍNTESE DOS PARÂMETROS QUE PODEM SER OBTIDOS COM AS SONDAgens DE POÇOS ACÚSTICA TELEVISIONADA, SÔNICA E FLOWMETER

| SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA | PARÂMETROS | | SONDA ACÚSTICA TELEVISIONADA | SONDA SÔNICA | SONDA FLOWMETER | |
|--|---|--------------------------------------|------------------------------|--------------|-----------------|---|
| RMR | Resistência do material rochoso intacto | Resistência a compressão axial (Mpa) | X | X | - | |
| | RQD (%) | | X | X | - | |
| | Espaçamento das descontinuidades (m) | | X | - | - | |
| | Condições das descontinuidades | Persistência (m) | | X | - | - |
| | | Abertura (mm) | | X | - | - |
| | | Rugosidade | | - | - | - |
| | | Preenchimento (mm) | | - | X | - |
| | Presença de água | Alteração | | - | - | - |
| | | Fluxo | | - | - | X |
| | | Pressão de água | | X | X | X |
| Condições gerais da água no maciço | | X | X | X | | |
| Fator de ajuste: orientação das descontinuidades | | X | - | - | | |
| Q | RQD (%) | | X | X | - | |
| | Famílias de descontinuidades (Jn) | | X | - | - | |
| | Rugosidade das descontinuidades (Jr) | | - | - | - | |
| | Grau de alteração das descontinuidades (Ja) | | - | - | - | |
| | Fator de redução de água (Jw) | | X | X | X | |
| | Estado de tensão do maciço (SRF) | | - | - | - | |
| GSI | Grau de fraturamento | | X | - | - | |
| | Condições superficiais das fraturas | | - | - | - | |

4.1 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO RMR

A seguir serão especificados todos os parâmetros necessários no sistema de classificação geomecânica RMR e quais deles podem ser obtidos com os equipamentos analisados.

4.1.1 Resistência do material rochoso intacto ou resistência a compressão axial

Com base no estudo realizado por Dantas (2018), observa-se que é possível obter a resistência do material rochoso intacto ou resistência a compressão axial (UCS) utilizando a perfilagem sônica de um poço. Para isso, é necessário realizar o pós-processamento dos dados da perfilagem a fim de definir a velocidade da onda P (V_p) resultante da diferença do tempo de trânsito da onda acústica entre os receptores do equipamento. A EQUAÇÃO 3 define este processo:

$$V_p = \frac{(1000000 * 0,2)}{\{(TIME Tx1 - Rx2) - (TIME TX1 - Rx1)\}}$$

EQUAÇÃO 3

Onde:

(TIME Tx1 – Rx2): é o tempo de trânsito da onda P até o receptor Rx2;

(TIME Tx1- Rx1): é o tempo de trânsito da onda P até o receptor Rx1.

Devido ao fato da perfilagem acústica televisionada ter o mesmo princípio de funcionalidade que a perfilagem sônica testada no estudo de Dantas (2018) (emissão e recepção de ondas acústicas) assume-se que a resistência a compressão axial do maciço rochoso também pode ser obtida com este equipamento.

Diversos autores investigaram a relação entre a velocidade das ondas P (V_p) e a resistência à compressão axial (UCS), a TABELA 3 apresenta as principais equações que foram desenvolvidas nestes trabalhos.

| TABELA 3 - EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO ENTRE VP E UCS DE DIFERENTES AUTORES | |
|--|---------------------|
| Referência | Correlação empírica |

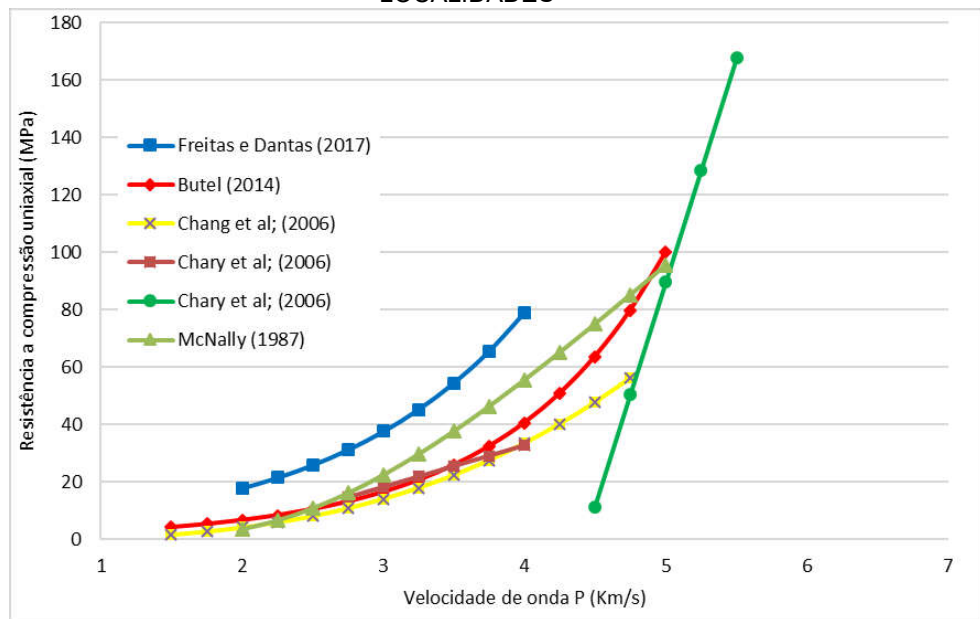
| | |
|---|--|
| Freyburg (1972) | $UCS = 35Vp - 31,5$ |
| Militzer (1973) | $UCS = (7682/\Delta t)^{1,82}/145$ |
| Ohomi (1981) | $UCS = k \cdot \rho \cdot Vp^2 + 31,18$ |
| McNally (1987) | $UCS = 8,27^{(-0,036\Delta t)}$ |
| Goktan (1988) | $UCS = 36Vp - 31,2$ |
| Moos <i>et al.</i> , (1999) | $UCS = 1,745 \cdot 10^{-9} \cdot \rho \cdot Vp^2 - 21$ |
| Tugrul e Zarif (1999) | $UCS = 35,54Vp - 55$ |
| Kahraman (2001) | $UCS = 9,95Vp^{1,21}$ |
| Horsrud (2001) | $UCS = 0,77(303,8/\Delta t)^{2,93}$ |
| Yasar e Erdogan (2004) | $UCS = (Vp - 2,0195)/0,032$ |
| Entwisle <i>et al.</i> ; (2005) | $UCS = 0,783^{0,882Vp}$ |
| Entwisle <i>et al.</i> ; (2005) | $UCS = 0,292 \cdot Vp^{4,79}$ |
| Unpublished: Chang <i>et al.</i> , (2006) | $UCS = 1,4138 \cdot 10^7 (\Delta t^{-3})$ |
| Chary <i>et al.</i> ; (2006) | $UCS = 156,4Vp - 692,41$ |
| Chary <i>et al.</i> ; (2006) | $UCS = 14,4Vp - 24,856$ |
| Mark <i>et al.</i> , (2007) | $UCS = 22,25^{(-0,054\Delta t)}$ |
| Sharma e Singh (2008) | $UCS = 64,2Vp - 117,99$ |
| Yagiz (2011) | $UCS = 49,4Vp - 167$ |
| Yagiz (2011) | $UCS = 0,258Vp^{3,543}$ |
| Kurtulus <i>et al.</i> ; (2011) | $UCS = 67,5Vp - 245,13$ |
| Kurtulus <i>et al.</i> ; (2011) | $UCS = 18,8Vp - 71,04$ |
| Jabbar <i>et al.</i> , (2011) | $UCS = 5363,64Vp$ |
| Hakan e Derya (2012) | $UCS = 14 \ln(Vp/n) - 96$ |
| Hakan e Derya (2012) | $UCS = 15 \ln(Vp/n) - 73$ |
| Hakan e Derya (2012) | $UCS = 0,0009(Vp/n) + 38$ |
| Azimian (2013) | $UCS = 0,026Vp - 20,207$ |
| Sheraz, (2014) | $UCS = 218,8Cp - 1413$ |
| Butel <i>et al.</i> ; (2014) | $UCS = 1,11e^{0,9Vp}$ |
| Freitas e Dantas (2017) | $UCS = 4,0966^{0,7394x}$ |

FONTE: Adaptado de Freitas *et al.*, 2017.

A determinação da resistência a compressão axial utilizando métodos indiretos, contudo, requer criteriosidade tendo em vista que muitos fatores influenciam neste parâmetro, como a porosidade, a densidade, tamanho dos grãos ou cristais, composição mineralógica e presença de descontinuidades (Barton, 2007).

No entanto, como a velocidade de propagação da onda acústica depende das propriedades elásticas do material rochoso, é correto afirmar que quanto maior for a resistência mecânica, maior será a coesão e por consequência maior será sua velocidade de propagação (FIGURA 3).

FIGURA 3 - CORRELAÇÕES OBTIDAS PARA ARENITOS DE DIFERENTES AUTORES E LOCALIDADES



FONTE: Freitas *et al.*, 2017.

4.1.2. Espaçamento entre as descontinuidades

Segundo Fiori (2015), o espaçamento ou frequência é a distância entre as descontinuidades e pode ser medido ao longo de uma linha de varredura (*scanline*) de no mínimo 5 metros ou em um testemunho de sondagem e é dado pela seguinte equação:

$$f = \frac{L}{N}$$

EQUAÇÃO 4

Onde:

L = comprimento perpendicular ao plano das descontinuidades

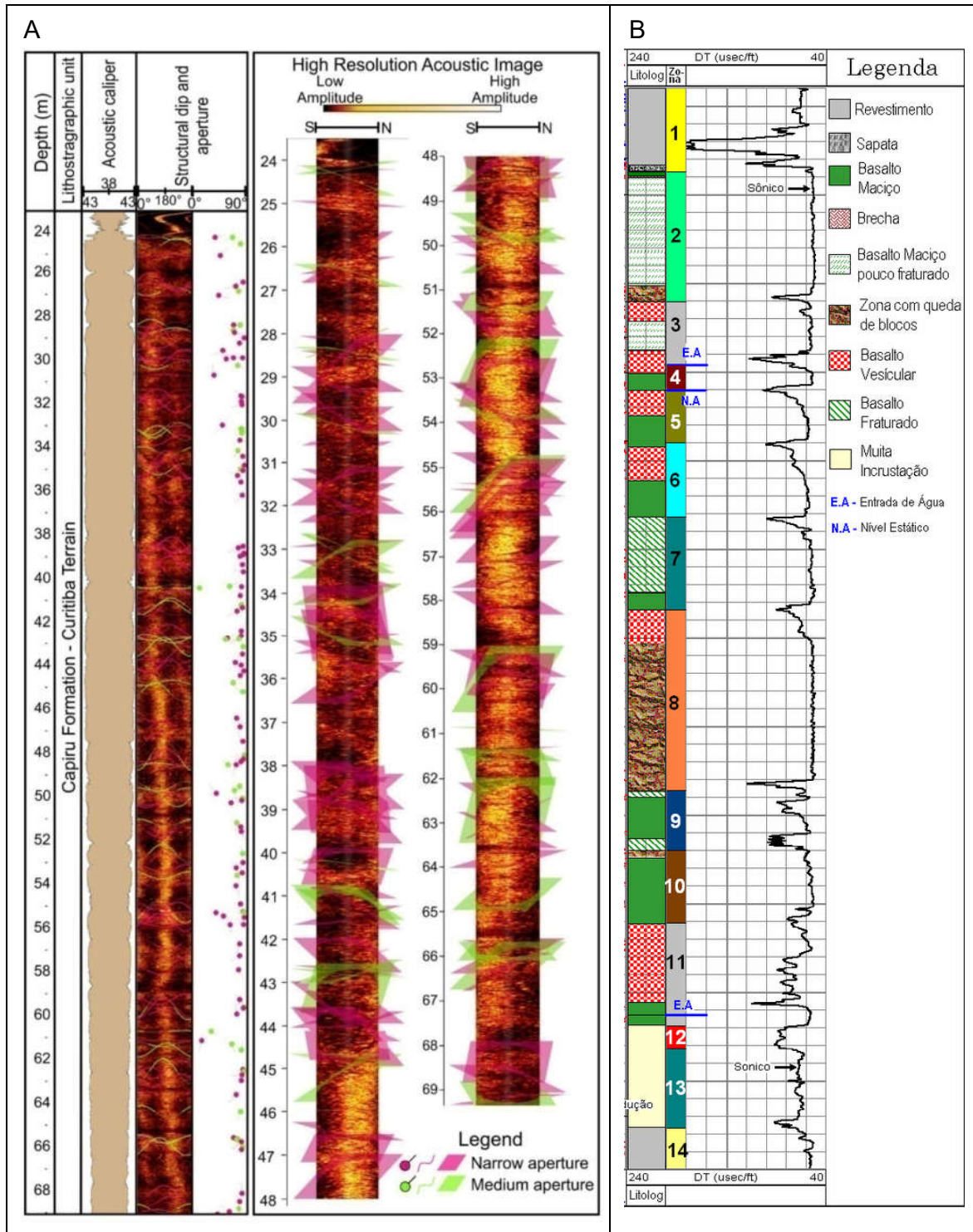
N = número de descontinuidades por metro

O espaçamento entre as descontinuidades é um parâmetro que busca determinar a dimensão dos blocos em que o maciço está compartimentado e está relacionado à permeabilidade do mesmo e conseqüente estabilidade, pois as forças que atuam na sua instabilidade são dependentes dos seus volumes (Fiori e Carmignani, 2009).

O estudo realizado por Filpi (2021) mostra, dentre outras informações, a caracterização típica de um poço a partir do método de perfilagem acústica televisionada. Analisando o perfil obtido neste trabalho (FIGURA 4A), observa-se que é possível calcular o espaçamento entre as descontinuidades uma vez que o poço em si corresponde a uma *scanline* e as descontinuidades estão registradas espacialmente no perfil, sendo exequível a investigação das relações entre elas.

Por outro lado, um exemplo típico de perfil sônico de poço elaborado por Nery e Macari (2006) (FIGURA 4B) deixa evidente que não é possível adquirir dados concisos das descontinuidades, uma vez que este tipo de perfil não apresenta disposição em três dimensões dos dados, dessa forma as zonas fraturadas podem ser apenas inferidas e, portanto, não há precisão e confiabilidade no espaçamento das descontinuidades.

FIGURA 4 - A) PERFIL TÍPICO GERADO POR SONDA ACÚSTICA TELEVISIONADA; B) PERFIL TÍPICO GERADO POR SONDA SÔNICA



FONTE: A) Filpi (2021); B) Nery e Macari (2006).

4.1.3 RQD

O *Rock Quality Designation* (RQD) foi definido por Deere em 1967 como um índice cuja finalidade é quantificar a qualidade das rochas obtidas em testemunhos de furos de sondagem. Esta variável é calculada segundo a EQUAÇÃO 5 e classificada segundo o ANEXO 4.

$$\text{RQD} = \frac{\sum \text{porções de rocha intacta com mais de 10 cm}}{\text{comprimento total do testemunho}} * 100$$

EQUAÇÃO 5

Alguns autores desenvolveram maneiras de estimar o RQD a partir do espaçamento ou frequência das descontinuidades (TABELA 4), ou seja, sem a necessidade dos testemunhos de sondagem.

TABELA 4 - MÉTODOS INDIRETOS DE OBTENÇÃO DO RQD

| Equação | Autor |
|---|--------------------------|
| $\text{RQD} = 100e^{-0,1f \times (0,1f+1)}$ | Hudson e Harrison (1997) |
| $\text{RQD} = 115 - 3,3J_v$ | Palmström (1982) |

FONTE: Santos (2015).

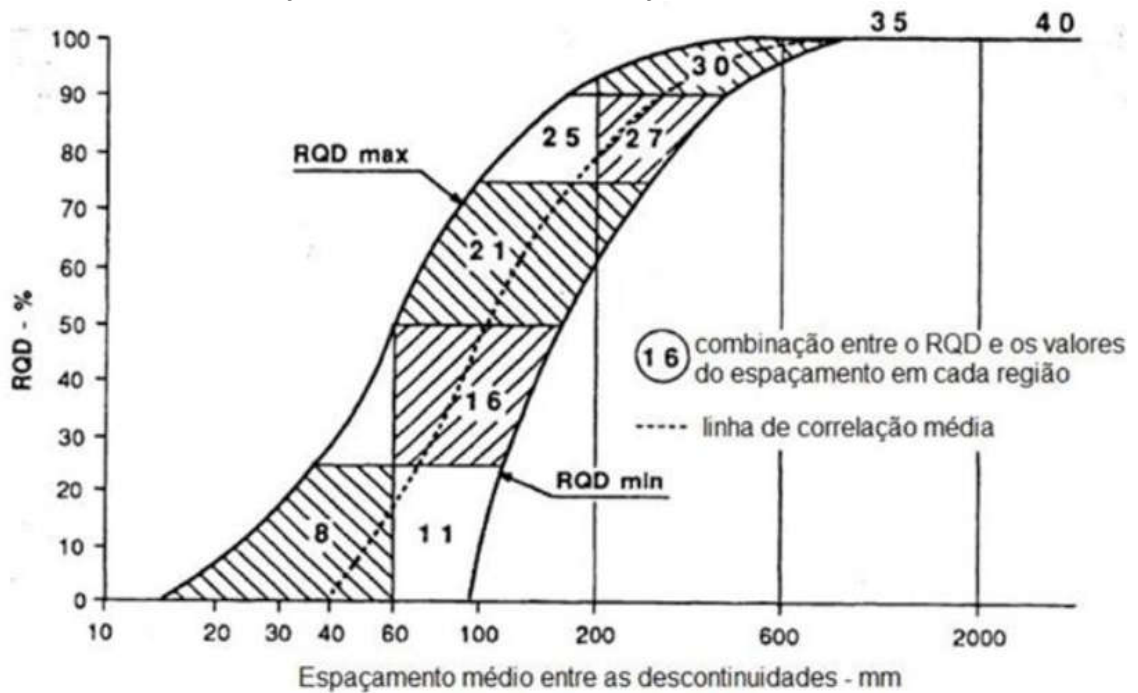
Onde:

f = número de descontinuidades por unidade de comprimento

J_v = contador volumétrico de juntas inferido de acordo com o Anexo 2.

O cálculo de f foi descrito no item anterior e requer um procedimento de amostragem eficaz para produzir estimativas consistentes (Sen e Kazi, 1984). Além da equação proposta por Hudson e Harrison (1997) de correlação entre o espaçamento das descontinuidades e o RQD, Bieniawski (1989) propôs um ábaco de correlação entre estas duas variáveis em que são estipulados valores de RQD máximo, mínimo e médio de acordo com cada valor obtido de f (FIGURA 5).

FIGURA 5 - CORRELAÇÃO ENTRE O RQD E O ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES



FONTE: Bieniawski (1989).

Já o contador volumétrico de juntas da equação de Palmström (1982) é definido pela EQUAÇÃO 6 a seguir:

$$J_v = \sum \frac{1}{S_i}$$

EQUAÇÃO 6

Onde:

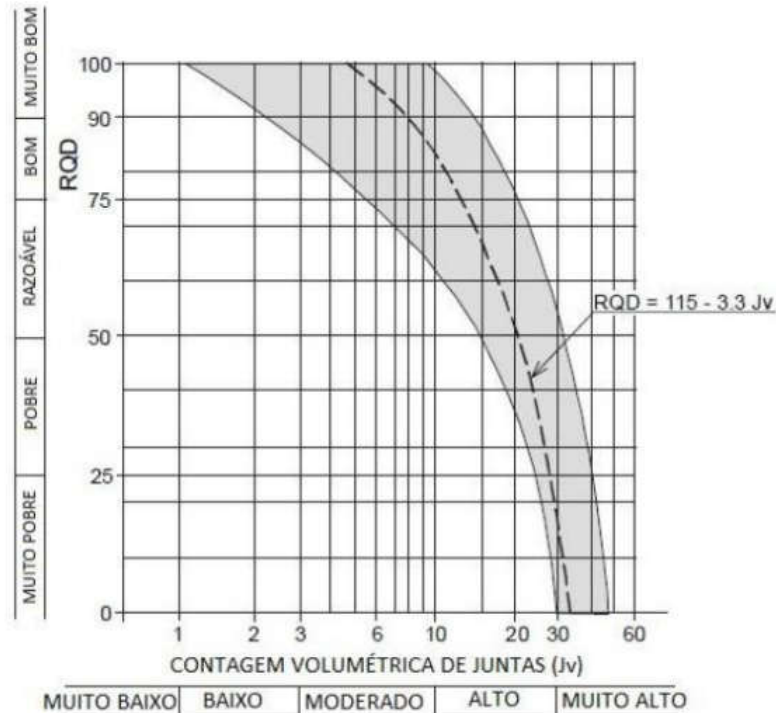
S_i = espaçamento das descontinuidades em metros para a referida família de descontinuidades.

O uso do J_v apresenta a vantagem de reduzir os problemas relacionados à dependência direcional das descontinuidades (Hoek e Karzulovic, 2000). Além da equação proposta por Palmström (1982) para determinação do RQD a partir deste parâmetro, o mesmo autor também propõe um ábaco que demonstra a correlação entre J_v e RQD (FIGURA 6).

Sendo assim, no que se refere às perfilagens geofísicas, naquelas em que é possível determinar o número de descontinuidades que interceptam as paredes do poço, também é possível determinar o índice RQD utilizando a fórmula de Hudson e

Harrison (1997) e naquelas em que se pode estabelecer o espaçamento das descontinuidades, o RQD é concebível pela equação de Palmström (1982). No caso das perfilagens em foco neste estudo, a que atende a este requisito é somente a perfilagem acústica televisionada, pois na perfilagem sônica não é possível fazer uma análise contundente das descontinuidades, como demonstrado no item anterior.

FIGURA 6 - CORRELAÇÃO ENTRE RQD E Jv



FONTE: Palmström (1982).

4.1.4. Condições das descontinuidades

As condições das descontinuidades para o sistema de classificação RMR é determinado levando em conta os seguintes parâmetros:

a) Persistência: a persistência da descontinuidade representa seu comprimento ou extensão medida em metros uma vez que a mesma é definida por um plano. Muitas vezes esse parâmetro é de difícil determinação, pois a visualização completa do plano em três dimensões é rara e, além disso, a descontinuidade pode estar intemperizada ou interrompida por fragmentos que impedem sua identificação. Contudo, é um fator muito importante no comportamento

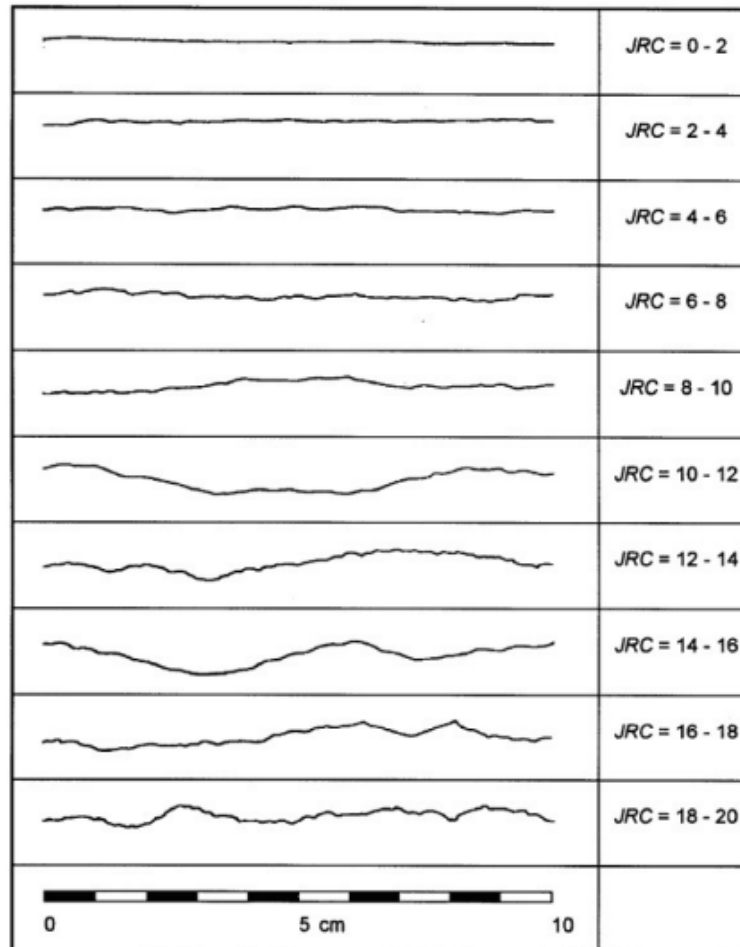
mecânico e hidráulico do maciço rochoso, influenciando em sua permeabilidade e estabilidade, sendo que as descontinuidades com maior persistência determinam os principais planos de ruptura (Fiori e Carmignani, 2009). Nas paredes de um poço a caracterização da persistência de uma descontinuidade é ainda mais dificultada, pois os poços apresentam uma abrangência muito pontual, apenas se a descontinuidade for exatamente paralela ao furo seria possível reconhecer esse parâmetro e mesmo assim com pouca confiabilidade, pois é impossível mensurar o quanto ela penetra no maciço. Dessa forma, assume-se que com a perfilagem sônica (FIGURA 4B) não é possível obter esse parâmetro e que com a perfilagem acústica televisionada (FIGURA 4A) é possível, porém em condições muito restritas.

b) Abertura: a abertura é a distância média, geralmente medida em milímetros, que separa paredes adjacentes de uma mesma descontinuidade. Este espaço de abertura pode ser preenchido por ar, água ou outros materiais e frequentemente varia em diferentes partes do maciço rochoso. Esta propriedade está ligada a fatores como a descompressão dos maciços, seu estado de meteorização, a ocorrência de deslocamentos de descontinuidades muito rugosas ou onduladas, com fenômenos de dissolução e lavagem de fraturas (Fontinhas, 2012). A perfilagem acústica televisionada é o único método de perfilagem geofísica de poços que permite a medição da abertura das descontinuidades como observado no trabalho realizado por Filpi (2021) (FIGURA 4A).

c) Rugosidade: esta propriedade é caracterizada pelas irregularidades e ondulações que ocorrem nas superfícies das descontinuidades e pode ser medida por meio da comparação visual com perfis de padrão de rugosidade, com isso é adotado um número de coeficiente para a rugosidade (JRC) (FIGURA 7) (ISRM, 1978). Estes perfis permitem classificar as paredes das descontinuidades primeiramente indentadas, onduladas e planares, lisas ou espelhadas. Com os dados da rugosidade bem definidos, é possível determinar a resistência ao cisalhamento do maciço rochoso, considerando que descontinuidades mais ásperas e onduladas deslizam menos do que as mais lisas e planas. Porém, quanto maior a abertura e/ou maior o preenchimento das descontinuidades, menor a influência da rugosidade na resistência ao cisalhamento (Fiori e Carmignani, 2009). De qualquer forma, este é um parâmetro que não pode ser definido por nenhum método de perfilagem geofísica de poço devido à natureza de funcionamento dos equipamentos

que registram o perfil a partir do tempo de trânsito das ondas acústicas e não captam a textura das descontinuidades.

FIGURA 7 - RELAÇÃO ENTRE O GRAU DE RUGOSIDADE E O ÍNDICE JRC



FONTE: Adaptado de Barton e Choubey (1977).

d) Preenchimento: o preenchimento ou enchimento é o material que completa total ou parcialmente a abertura entre as descontinuidades. Sua caracterização é feita a partir da medição, geralmente em milímetros, da espessura deste material e pela descrição do mesmo, incluindo a identificação da mineralogia, do tamanho dos grãos ou cristais, assim como indicação do teor em água e estimativa qualitativa da permeabilidade (ISRM 1978). A composição do preenchimento pode ser desde os materiais mais brandos até os mais resistentes, facilitando ou dificultando as movimentações mecânicas e, dependendo das suas características, pode também facilitar percolação de água, o que favorece

deslizamentos. O preenchimento parcial com pontos de contatos rocha-rocha é o que apresenta maior dificuldade de análise (Fiori e Carmignani, 2009). Exemplos típicos dos perfis acústico televisionado e sônico de poços (FIGURA 4A e B) demonstram que é possível ter uma noção superficial do preenchimento das discontinuidades em ambos os perfis. No sônico, é possível identificar contatos e litologias, porém somente em estruturas sub-horizontais e que tenham uma abertura significativa para sua identificação. No perfil acústico televisionado, não é possível identificar litologia, somente contrastes composicionais delimitando diferentes zonas acústicas. Dessa forma, a descrição desse parâmetro não é completa e satisfatória em nenhum destes métodos de perfilagem.

e) Alteração: Jaques (2014) define o grau de alteração como a maior ou menor capacidade dos minerais constituintes do maciço rochoso de resistirem às transformações de suas propriedades físicas, químicas e estruturais quando expostos à ambientes diferentes daqueles em que foram formados. Quanto maior o grau de alteração do maciço, menor sua resistência mecânica, maior a variação da deformabilidade, da porosidade e da permeabilidade.

A TABELA 5 sumariza as nomenclaturas utilizadas em campo para se definir qual o grau de alteração das rochas analisadas. Nenhum dos métodos de perfilagem geofísica de poços analisados possibilita a obtenção de uma descrição satisfatória da alteração das discontinuidades.

TABELA 5 - CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO COM BASE EM SEU GRAU DE ALTERAÇÃO

| Grau de alteração | Explicação |
|--------------------------|--|
| Sem alteração (rocha sã) | Alteração mineralógica nula ou incipiente. Minerais preservam brilho original, cor e clivagem. Foliação visível e selada. Resistência original da rocha não afetada pela alteração. |
| Alteração moderada | Matriz descolorida, com evidências de oxidação. Juntas abertas (<1,00 mm) e oxidadas, podendo ocorrer material mais alterado ao longo das discontinuidades. Foliação realçada pelo intemperismo. Resistência afetada. |
| Muita alteração | Alteração acentuada, alguns materiais parcialmente decompostos. Matriz totalmente oxidada e cores muito alteradas. Fraturas abertas (2< e <5 mm) e oxidadas. Foliação realçada pelo intemperismo. Desplacamentos ao longo da foliação. |
| Alteração extrema | Material completamente alterado para solo estruturado. Extremamente descolorido, minerais resistentes quebrados e outros transformados em argilominerais. Foliação preservada. Juntas |

| | |
|---------------|---|
| | não discerníveis. |
| Solo residual | Material totalmente transformado em solo. |

FONTE: Adaptado de ISRM (1981).

4.1.5. Presença de água

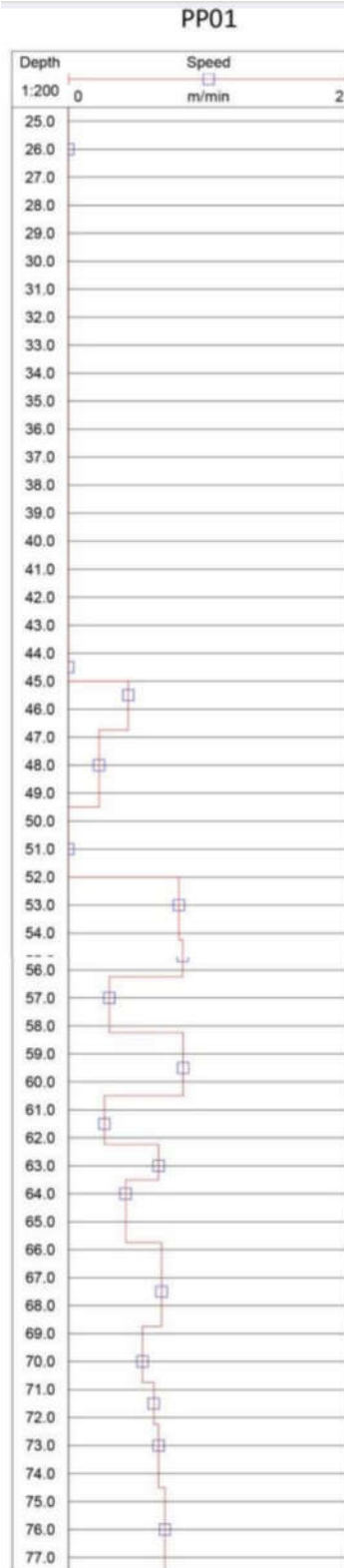
Fiori (2015) define a presença de água como a porcentagem do volume de vazios do maciço que contém água. Este fator associado às descontinuidades é uma das principais características que condicionam a instabilidade dos maciços rochosos por diminuir a resistência ao deslizamento e acelerar os processos de intemperismo.

Para o sistema de classificação geomecânica RMR, a caracterização da água é feita de acordo com a tabela proposta por Bieniawski (1989) exposta no ANEXO 1 em que são determinados valores para o fluxo da água por minuto, para a pressão de água na fratura ou tensão principal e para as condições gerais da água subterrânea.

Em todos os tipos de perfilagens geofísicas estudados é possível determinar as condições gerais da presença de água (completamente seco, úmido, encharcado, gotejando, com fluxo) uma vez que as ondas acústicas se propagam com maior velocidade na presença da água em relação ao ar e estas velocidades são registradas pelos receptores destes equipamentos.

Dentre os métodos de perfilagem de poços analisados, o único capaz de medir o fluxo de água é *flowmeter*, como observado na FIGURA 8 que representa um perfil típico elaborado por Fanti (2015) utilizando este método.

FIGURA 8 - PERFIL TÍPICO GERADO POR Sonda FLOWMETER



FONTE: Adaptado de Fanti (2015).

A pressão de água, por outro lado, pode ser estimada com base na altura da coluna d'água dentro do poço. Considerando que todos os métodos de perfilagem geofísica aqui estudados necessitam da presença de água no poço para se funcionarem de maneira eficaz, fica fácil saber em que profundidade se inicia e termina a presença de água.

4.1.6 Fator de ajuste: orientação das descontinuidades

O fator de ajuste no sistema RMR é feito com base na orientação das descontinuidades (direção e mergulho) que é relacionada à orientação das paredes de grandes obras civis (túneis e minas, fundações e taludes) (ANEXO 1). Por isso, nem sempre este fator é aplicado, pois nem sempre há a relação com este tipo de obra.

De todo modo, o único método de perfilagem que possibilita a obtenção deste parâmetro, dentre os estudados, é a sondagem acústica televisionada que gera dados orientados e assim, as descontinuidades são caracterizadas por completo no espaço 3D (FIGURA 4), podendo ser comparadas com a orientação de outras estruturas, como as paredes das grandes obras.

4.2 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO Q

A seguir serão especificados todos os parâmetros necessários no sistema de classificação geomecânica Q e quais deles podem ser obtidos com os equipamentos analisados.











4.2.1 Condições de compartimentação do maciço (J_n)

Este parâmetro se refere às famílias de descontinuidades e pode ser expresso em termos de um número médio por unidade de área ou de volume do maciço rochoso (Fiori, 2015).

Para determinar as famílias de fraturas deve se considerar um agrupamento que segue um mesmo padrão bem definido. Os valores para J_n podem ser determinados a partir do mapeamento das descontinuidades, plotagem em

estereogramas e contorno dos agrupamentos, conforme ábaco da FIGURA 9, e pode variar de 0,5 (sem juntas) a 20 (rocha completamente fraturada) (Barbosa, 2008).

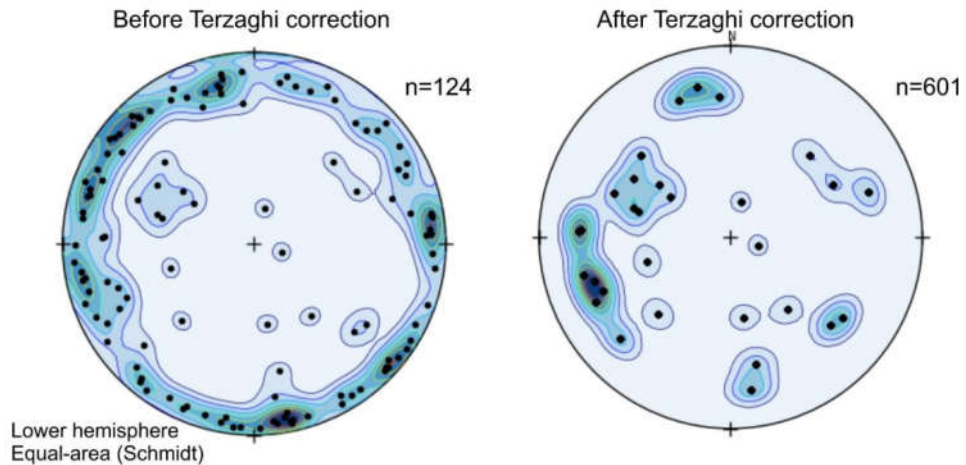
FIGURA 9 - DETERMINAÇÃO DE JN A PARTIR DO NÚMERO DE FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES

| <i>Numero das famílias de juntas</i> | | <i>Jn</i> | | | <i>Numero das famílias de juntas</i> |
|---|--|-----------|----|---|--------------------------------------|
| Rocha Intacta Sem Juntas |  | 0.5 | 1 |  | Somente algumas juntas aleatórias |
| 1 Família |  | 2 | 3 |  | 1 Família + juntas aleatórias |
| 2 Famílias |  | 4 | 6 |  | 2 Famílias + juntas aleatórias |
| 3 Famílias |  | 9 | 12 |  | 3 Famílias + juntas aleatórias |
| 4 Famílias Forte concentração de juntas |  | 15 | 20 |  | Aspecto de solo Rocha fragmentada |

FONTE: Barbosa (2008).

Nesse sentido, dentre os métodos de perfilagem geofísica de poços estudados, o único em que é possível estabelecer valores para J_n é a perfilagem acústica televisionada, pois somente ele representa a geometria das descontinuidades e permite assim, a confecção de estereogramas, como observado no trabalho desenvolvido por Filpi (2021) em que foram desenvolvidos estereogramas com base na perfilagem acústica televisionada de um poço (FIGURA 10).

FIGURA 10 - DIAGRAMAS ESTRUTURAIS REPRESENTANDO OS PÓLOS DOS PLANOS DAS DESCONTINUIDADES CARACTERIZADAS PELA SONDA HRAT



FONTE: Filpi (2021).

4.2.2 Rugosidade das discontinuidades (J_r)

Este parâmetro varia de 0,5 (desfavorável) a 4,0 (favorável) e descreve a textura da superfície das fraturas, conforme o esquema apresentado na FIGURA 11 abaixo (Barbosa, 2008).

FIGURA 11 - RUGOSIDADE DAS DESCONTINUIDADES EM ESCALA MAIOR E MENOR

| | | Escala maior: | | |
|--|--|---------------|----------|--------|
| | | Planar | Ondulada | Rugosa |
| <i>J_r</i> (Conjunto Crítico) | | | | |
| Escala Menor: | | | | |
| Espelhada | | 0.5 | 1.5 | 2.0 |
| Lisa | | 1.0 | 2.0 | 3.0 |
| Rugosa | | 1.5 | 3.0 | 4.0 |
| Pulverulenta Sem contato com a parede | | 1.0 | 1.0 | 1.5 |

FONTE: Adaptado de Hurchinson e Diederichs (1996) apud Barbosa (2008).

Este parâmetro se assemelha muito ao descrito no item 4.1.4 para o sistema de classificação RMR e da mesma forma que anteriormente citado, não é possível obtê-lo nenhum dos métodos de perfilagem geofísica de poços estudados, pois os mesmos não são capazes de registrar a textura das descontinuidades.

4.2.3 Grau de alteração das descontinuidades (Ja)

O parâmetro Ja descreve a alteração da superfície e a resistência ao atrito da família das fraturas crítica do maciço rochoso e pode variar de 0,75 (favorável) a 20 (desfavorável) (Barbosa, 2008). Barton, Lien e Lunde (1974), mesmos autores que conceberam o sistema de classificação Q, propuseram uma lista de classificações das alterações que são correlacionáveis aos valores de Ja (TABELA 6).

TABELA 6 - DESCRIÇÃO TÍPICA DA ALTERAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES EM ROCHA DURA

| Descrição Típica (Conjunto de Juntas Críticas) | <i>Ja</i> |
|---|-----------|
| Impermeável | 0.75 |
| Somente descoloração da superfície | 1.0 |
| Parede das juntas levemente alterada. revestimento mineral espaçado. | 2.0-3.0 |
| Revestimento de baixo atrito (clorita, mica, talco, argila) < 1 mm de espessura | 3.0-6.0 |
| Zonas ou bandas de material fino, baixo atrito 1 - 5 mm de espessura | 6.0-10.0 |
| Zonas ou bandas espessas de material fino, baixo atrito > 5 mm de espessura | 10.0-20.0 |

FONTE: Barton, Lien e Lunde (1974) apud Barbosa (2008).

Este fator, assim como o anterior, apresenta uma equivalência com a alteração descrita no item 4.1.4 para o sistema de classificação RMR e, assim como apontado naquele item, nenhum dos métodos de perfilagem geofísica de poços em foco representa de maneira satisfatória a alteração das descontinuidades, pois são métodos indiretos e a alteração é um parâmetro puramente descritivo que necessita de uma amostragem direta.

4.2.4 Fator de redução de água (Jw)

O fator de redução de água (Jw) considera o grau de afluência da água e é correlacionável com a pressão de água no maciço rochoso, como detalhado na TABELA 7 (Barton *et al.*, 1974).

Os valores de Jw podem variar de 1,0 para escavações secas a 0,05 para escavações com pressão e afluência excessiva, sendo que quanto mais baixo este valor, maior a pressão de água e, por consequência, maior a desestabilização nos maciços ao longo dos planos de descontinuidade.

TABELA 7 - CONDIÇÃO DE AFLUÊNCIA E PRESSÃO DE ÁGUA

| Presença de água | Pressão (kPa) | Jw |
|--|---------------|----------|
| Escavação seca (menos de 5 litros/minuto localmente) | < 100 | 1.0 |
| Fluxo ou pressão média | 100-250 | 0.66 |
| Fluxo grande ou alta pressão Sem preenchimento da junta | 250-1000 | 0.5 |
| Fluxo grande ou alta pressão Lavagem do preenchimento de junta | 250-1000 | 0.33 |
| Pressão ou influxo excepcionalmente grande Decréscimo após escavação | > 1000 | 0.2-0.1 |
| Pressão ou fluxo excepcionalmente grande Nenhuma redução após escavação | > 1000 | 0.1-0.05 |

FONTE: Barton, Lien e Lunde (1974) apud Barbosa (2008).

Da mesma forma que para o tópico 4.1.5 (presença de água para o sistema de classificação RMR), presume-se que este fator relacionado ao fluxo possa ser medido com a sonda *flowmeter* e a pressão de água possa ser inferida com base na espessura da coluna d'água do poço onde são feitas as medições, sendo a pressão obtida com qualquer um dos métodos de perfilagem estudados.

4.2.5 Estado de tensão do maciço (SRF)

O parâmetro “*Stress Reduction Factor*”, ou SRF, representa o estado de tensão total do maciço rochoso para rochas competentes, as pressões de compressão ou expansão em maciços rochosos incompetentes ou expansivos e a pressão de afrouxamento durante uma escavação através de zonas de cisalhamento para uma zona alterada (Singh e Goel, 2011).

A tensão total pode ser definida com base na seguinte equação:

$$SRF = \frac{\delta_c}{\delta_1}$$

EQUAÇÃO 7

Onde δ_c é a resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso (UCS) e δ_1 é tensão principal antes da escavação.

Como demonstrado no item 4.1.1 utilizando o estudo de Dantas (2018) como base, verifica-se que é possível obter a resistência à compressão axial (UCS) utilizando a velocidade das ondas acústicas P (V_p) obtida durante as perfilagens sônica e acústica televisionada. Portanto, uma das duas variáveis pode ser obtida com as perfilagens geofísicas de poços, porém a outra variável não é passível de obtenção, por isso o índice SRF como um todo também não pode ser alcançado por nenhum método de perfilagem estudado neste trabalho.

4.3 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO GSI

A seguir serão discutidos quais dos parâmetros necessários para a classificação geomecânica *Geological Strength Index* (GSI) são obtidos com as perfilagens geofísicas de poços em foco.

4.3.1 Grau de fraturamento

Esse parâmetro diz respeito à estrutura do maciço rochoso, ou seja, como ele está compartimentado: em blocos, muitos blocos interconectados, em blocos caóticos ou desintegrado, conforme descrito na tabela do ANEXO 3.

Dentre os métodos de perfilagem geofísica analisados, o que melhor descreve este parâmetro é a perfilagem acústica televisionada, pois com ela é

possível ter uma descrição detalhada de como está a geometria das fraturas, o espaçamento e a interconexão entre elas (FIGURA 4A).

Por outro lado, com a perfilagem sônica, em que também é possível identificar as zonas fraturadas, a relação de conexão entre elas não é exata, pois as discontinuidades não são representadas no espaço 3D (FIGURA 4B). Sendo assim, apesar deste método indicar grosseiramente como se dá a compartimentação do maciço rochoso, não fornece as informações completas necessárias para a determinação do grau de fraturamento para a classificação pelo sistema GSI.

4.3.2 Condições superficiais das fraturas

As condições superficiais das fraturas no sistema GSI são classificadas em uma escala puramente qualitativa que varia em: muito bom, bom, razoável, ruim e muito ruim (ANEXO 3).

De forma geral, para adotar um destes níveis de qualidade é analisado se a fratura tem uma superfície áspera, lisa ou estriada, o grau de alteração e intemperismo da rocha e o material que preenche as fraturas. Todos estes fatores se assemelham muito com aqueles apresentados no item 4.1.4 desta monografia, utilizados no sistema de classificação RMR, com a diferença de que para o sistema RMR são quantitativos. Em todo caso, raramente estes parâmetros são obtidos com métodos indiretos e nenhuma das sondas estudadas permite detalhar a descrição parâmetro, porém para uma análise puramente qualitativa das condições superficiais de acordo com o ábaco do ANEXO 3, a perfilagem acústica televisionada atende aos requisitos necessários.

5 DISCUSSÕES

5.1 PONDERAÇÃO SOBRE O USO DE MÉTODOS INDIRETOS NA OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMECÂNICOS

A caracterização geológica e geotécnica com base em métodos indiretos se dá pelo pressuposto de que existem propriedades físicas que permitem a distinção das diferentes camadas e estruturas condicionantes do maciço rochoso. Contudo,

nem sempre essa premissa é válida e, por isso, este tipo de estudo deve sempre estar acompanhado de um bom controle da geologia regional e local, preferencialmente mediante análises de campo executadas diretamente.

No entanto, mesmo quando as informações diretas são mais difíceis de serem obtidas, o emprego de mais de um método indireto e/ou a construção de perfis que correlacionem mais de um ponto levantado (neste caso, mais de um poço), possibilita uma melhor compreensão do todo, gera dados mais robustos e acurados. Um método direto que pode contribuir significativamente neste processo e que tem uma aplicação relativamente fácil, barata e que pode ser realizada concomitantemente às sondagens geofísicas nos poços é o televisionamento ótico, sua aplicação pode colaborar inclusive na coordenação das decisões em campo.

Tendo isso em vista, as principais vantagens de se utilizar métodos indiretos na obtenção dos parâmetros geomecânicos consistem na: i) rapidez e praticidade com que estes dados são adquiridos em relação aos ensaios laboratoriais que, além de serem onerosos, são demorados, não só para serem executados, mas também pelas particularidades intrínsecas à obtenção de amostras representativas; e ii) na fluidez do trabalho, uma vez que é possível realizar diversas medições e testes em uma só visita de campo, inclusive, concomitantemente à perfuração do poço ou furo de sondagem.

Quanto às desvantagens, os métodos de sondagem acústica televisionada, sônica e *flowmeter* investigados neste estudo apresentam significativas limitações para as aplicações geotécnicas, pois foram desenvolvidos com foco na área da hidrogeologia. São poucas as técnicas nesse estilo construídas especificamente para a conquista de informações geotécnicas e, por isso, os equipamentos de geotecnia de laboratório são, na maioria das vezes, mais confiáveis no quesito de aquisição de dados quantitativos voltados para as classificações geomecânicas.

5.2 COMPARAÇÃO QUALITATIVA ENTRE AS SONDAJENS GEOFÍSICAS

No que concerne aos parâmetros dos sistemas de classificação RMR, Q e GSI obtidos com as sondagens geofísicas focadas nesta monografia, o método que se mostrou mais promissor foi o da perfilagem acústica televisionada, dado que nos três sistemas de classificação geomecânica analisados, é possível atingir no mínimo

50% dos parâmetros necessários com este método (TABELA 8). Além disso, os parâmetros que não são alcançados com esta sondagem se referem a dados como alteração, fluxo de água e condições superficiais, que não possuem os maiores pesos nas classificações geomecânicas e que seus efeitos estão embutidos em parâmetros de maior peso, como a resistência à compressão axial, RQD, orientação, famílias, espaçamento e abertura das descontinuidades.

A sondagem sônica fica em segundo lugar (TABELA 8), tendo como maior limitador a não representação espacial das descontinuidades e por consequência a não aquisição de todos os dados que tenham relação com suas orientações. Por último, está a sondagem *flowmeter* (TABELA 8), visto que o fluxômetro de calor é voltado apenas para o registro das informações relacionadas à água.

TABELA 8 - CONTAGEM DOS PARÂMETROS NECESSÁRIOS EM CADA CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA E OS OBTIDOS NAS SONDAJENS GEOFÍSICAS

| Sistema de classificação geomecânica | Total de parâmetros necessários | Total de parâmetros obtidos pela sonda acústica televisionada | Total de parâmetros obtidos pela sonda sônica | Total de parâmetros obtidos pela sonda <i>flowmeter</i> |
|--------------------------------------|---------------------------------|---|---|---|
| RMR | 12 | 8 | 5 | 3 |
| Q | 6 | 3 | 2 | 1 |
| GSI | 2 | 2 | 0 | 0 |

FONTE: A autora (2022).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É fato que quanto mais criterioso um sistema de classificação geomecânica, mais criteriosa é também a aquisição de seus parâmetros. E quanto maior o risco geotécnico de uma obra, mais criteriosa deve ser a classificação do maciço rochoso eventualmente utilizado para projetá-la. Por isso, é difícil comparar os sistemas de classificação entre si e quando exatamente as perfilagens geofísicas podem ou não serem aplicadas para obtenção dos parâmetros requeridos.

Contudo, este trabalho buscou contribuir para uma visão geral da aplicação destas perfilagens nos sistemas de classificação geomecânica mais utilizados e cumpriu com os objetivos propostos, uma vez que agregou ao conhecimento já existente sobre a aplicabilidade de perfilagens geofísicas de poços nas classificações geomecânicas RMR, Q e GSI ao avaliar cada um dos critérios necessários nestas classificações, identificar e caracterizar os dados obtidos com

estas perfilagens, além de compilá-los e compará-los, como exposto tanto nos resultados obtidos quanto nas discussões desta monografia.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudos de revisão bibliográfica de trabalhos de caráter aplicados apresentam limitações intrínsecas à sua natureza, pois não testam na prática as ideias propostas. Por isso, sugere-se que para que a validade desta monografia seja ainda maior, seja realizada a execução das perfilagens geofísicas voltadas para a obtenção dos parâmetros geomecânicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE (Associação Brasileira de Geologia e Engenharia). **Geologia de engenharia**. Editores: OLIVEIRA, A. M. de; BRITO, S. N. A. de, São Paulo (SP), 1998, 508 p.

ÁVILA, C. R. **Determinação das propriedades mecânicas de maciços rochosos e/ou descontinuidades utilizando classificações geomecânicas – uma comparação entre os diversos métodos de classificação**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (MG), 2012, 173 p.

BARBOSA, E. S. **Avaliação do suporte com cabos de aço na mina Cuiabá (Sabará / MG)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica), Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (MG), 2008, 154 p.

BARTON, N. **Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy**. Editores: Taylor & Francis, Balkema, London (UK), 2007, 729 p.

BARTON, N. R.; CHOUBEY, V. **The shear strength of rock joints in theory and practice**. Rock Mechanics, vol 10, 1977, 55 p.

BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. **Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support**. Rock Mechanics, v. 6, 1974, 236 p.

BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering Rock Mass Classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering**. Editora: John Wiley e Sons, New York (US), 1989, 251 p.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E.T. **Rock mechanics for underground mining**. 3. Ed., Editora: Kluwer Academic Publishers, New York (US), 2006, 628 p.

DANTAS, J. G. M. **Estimativa da resistência à compressão, densidade e porosidade do maciço rochoso e rocha intacta a partir da velocidade sônica de campo e laboratorial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), 2018, 110 p.

DEERE, D.U.; HENDRON, A.J.; PATTON, F.D.; CORDING, E.J. **Design of surface and near surface construction in rock**. Failure and breakage of rock. Editora: C. Fairhurst, Proceedings - VIII U.S. Symposium of Rock Mechanics, 1967, 302 p.

FANTI, A. C. **Investigação de aquífero fraturado para entendimento de fluxo e transporte de contaminantes clorados: estudo de caso em Valinhos, SP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral), Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo (SP), 2015, 134 p.

FILPI, T. C. F. C. M. **Estimativas de permeabilidade em Aquífero Cárstico a partir de métodos de alta resolução**. Dissertação (Mestrado em Geologia),

Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2021, 94 p.

FIORI, A. P. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Editora: Oficina de Textos, São Paulo (SP), 3 ed, 2015, 548p.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Editora: Oficina de Textos, 2 ed., 2009, 604 p.

FONTINHAS, A. M. P. **Aplicação do SMR na avaliação da estabilidade de taludes de escavação em grauaques da Formação de Mértola**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica - Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geológica, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa (PT), 2021, 94 p.

FREITAS, N. B. A., DANTAS, J. G. M., ZINGANO, A. C. **Equação de correlação com ênfase na litologia para estimativa de resistência à compressão uniaxial através do uso do Pundit**. Anais do Congresso Anual da ABM, São Paulo (SP), 2017, 410 p.

HOEK, E. **Strength of rock and rock masses**. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering (ISRM) - New Journal, volume 2, Lisboa (PT), 1994, 16 p.

HOEK, E.; KARZULOVIC, A. **Rock mass properties for surface mines - Slope Stability in Surface Mining**. Editores: Hustrulid, W. A.; McCarter, M. K.; Zyl, D. J., Society for Mining, Metallurgical and Exploration, Littleton, Colorado (US) 2000, 70 p.

HOEK, E.; KAISER, P. K.; BAWDEN, W. F. **Support of Underground Excavations in Hard Rock**. Editora: A. A. Balkema, Rotterdam (NL), 1995, 225 p.

HOEK, E.; BROWN, E. T. **Underground Excavations in Rock**. Publicação: Institution of Mining and Metallurgy, Editora: CRC Press, Londres (ENG) e New York (US), 1980, 527 p.

HUDSON, J. A.; HARRISON J. P. **Engineering rock mechanics: an introduction to the principles**. Editora: Elsevier Science Ltd, 1 ed, Oxford, London (UK), 1997, 896 p.

HUTCHINSON, D.J.; DIEDERICHS, M.S. **Cablebolting in Underground Mines**. Editora: Richmond, British Columbia, Canada, 1996, 406 p.

ISRM (International Society for Rock Mechanics). **Rock Characterization Testing and Monitoring**. Royal School of Mines, London (UK), 1981, 211 p.

ISRM (International Society for Rock Mechanics). **Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1978, 368 p.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de exploração**. Tradução de: COELHO, M. C. M. Editora: Oficina de Textos, São Paulo (SP), 2009, 429 p. Título original: An introduction to geophysical exploration.

JQUES, D. S. **Caracterização e classificação de maciços rochosos da mina de volta grande, Nazareno, Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (MG), 2014, 182 p.

MARINOS V., MARINOS P., HOEK E. (2007). **The geological strength index: applications and limitations**. Bulletin of Engineering Geology and the Environment – Springer edition, 2007, 65 p.

NERY, G.; Macari, R. **Estudo do comportamento da perfilagem ótica e geofísica na formação Serra Geral**. Águas Subterrâneas, [S. l.], 2006. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22603>>. Acesso em: 20 dez. 2021.

PALMSTRÖM, A. **The volumetric joint count - a useful and simple measure of the degree of jointing**. Proceedings - IV International Congress, International Association of Engineering (IAEG), New Delhi (IND), 1982, 228 p.

PRIEST, S. D. **Discontinuity analysis for rock engineering**. Editora: Chapman & Hall, London (UK), 1993, 470 p.

ROBERTSON GEO. **Full Waveform Sonic Probe – Version 3.1**. Manual de usuário. 2020b, 16 p.

ROBERTSON GEO. **Heat-Pulse Flowmeter Probe – Version 3.1**. Manual de usuário. 2020c, 14 p.

ROBERTSON GEO. **HighResolution AcousticTeleviewer – Version 3.1**. Manual de usuário. 2020a, 24 p.

SANTOS, T. B. **Aplicabilidade das classificações geomecânicas e retroanálises para estimação das propriedades dos maciços rochosos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral (PPGEM), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (MG), 2015, 147 p.

SEN, Z.; KAZI, A. **Discontinuity spacing and RQD estimates from finite length scanlines**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v. 21, 1984, 212 p.

SINGH, B.; GOEL, R. K. **Engineering Rock Mass Classification**. Editora: Butterworth-Heinemann, Oxford, New York (US), 2011, 61 p.

UNESP (Universidade Estadual Paulista). **Tipos de revisão de literatura**. Biblioteca Prof. Paulo de Carvalho Mattos, Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP, Campus de Botucatu, Botucatu (SP), 2015. Disponível em <<https://www.fca.unesp.br/Home/Biblioteca/tipos-de-evisao-de-literatura.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2021.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. W. **Rock Slope Engineering - Civil And Mining**. 4. Ed., Editora: Spon Press, New York (US), 2004, 431 p.

**ANEXO 1 – TABELAS DE REFERÊNCIA PARA A DEFINIÇÃO DOS
PARÂMETROS DO SISTEMA RMR**

PARÂMETRO 1: Determinação do valor associado à resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (Bieniawski, 1989 apud Santos, 2015).

| Resistência da rocha intacta | | Valor associado (P1) |
|---|---|----------------------|
| Resistência à compressão uniaxial (MPa) | Índice de carga pontual (MPa) | |
| > 250 | > 10 | 15 |
| 100 a 250 | 4 a 10 | 12 |
| 50 a 100 | 2 a 4 | 7 |
| 25 a 50 | 1 a 2 | 4 |
| 5 a 25 | | 2 |
| 1 a 5 | Para valores menores de resistência à carga puntiforme: utilizar o teste de compressão uniaxial | 1 |
| < 1 | | 0 |

PARÂMETRO 2: Determinação do valor associado ao índice de qualidade da rocha (Bieniawski, 1989 apud Santos, 2015).

| Índice de qualidade da rocha (%) | 90 a 100 | 75 a 90 | 50 a 75 | 25 a 50 | < 25 |
|----------------------------------|----------|---------|---------|---------|------|
| Valor associado (P2) | 20 | 17 | 13 | 8 | 3 |

PARÂMETRO 3: Determinação do valor associado ao espaçamento entre as descontinuidades (Bieniawski, 1989 apud Santos, 2015).

| Espaçamento das descontinuidades | > 2 m | 0,6 a 2m | 200 a 600 mm | 60 a 200 mm | <60 mm |
|----------------------------------|-------|----------|--------------|-------------|--------|
| Valor associado (P3) | 20 | 15 | 10 | 8 | 5 |

PARÂMETRO 4: Determinação do valor associado à cada sub-parâmetro das condições das descontinuidades e da condição final (Bieniawski, 1989 apud Santos, 2015).

| | | | | | |
|------------------------|--------------|-----------------------|------------------------|---------------------|------------|
| Persistência | 1 m | 1 a 3 m | 3 a 10 m | 10 a 20 m | > 20 m |
| Valor associado | 6 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| Abertura | Nenhuma | < 0,1mm | 0,1 a 1,0 mm | 1 a 5 mm | > 5 mm |
| Valor associado | 6 | 5 | 4 | 1 | 0 |
| Rugosidade | Muito rugosa | Rugosa | Levemente rugosa | Lisa | Estriada |
| Valor associado | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 |
| Preenchimento | | Preenchimento duro | | Preenchimento macio | |
| Valor associado | Nenhum | < 5 mm | > 5 mm | < 5 mm | > 5 mm |
| | 6 | 4 | 2 | 2 | 0 |
| Alteração | Não alterada | Ligeiramente alterada | Moderadamente alterada | Muito alterada | Decomposta |
| Valor associado | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 |

| Condição das descontinuidades | Valor associado (P4) |
|---|-----------------------------|
| Descontinuidades com superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação e parede da rocha não alterada. | 30 |
| Descontinuidades com superfícies levemente rugosas, com separação (abertura) menor que 1 mm e paredes da rocha ligeiramente intemperizadas. | 25 |
| Descontinuidades com superfícies levemente rugosas, separação (abertura) menor que 1 mm e paredes da rocha muito intemperizadas. | 20 |
| Descontinuidades contínuas com superfícies estriadas ou com preenchimento de espessura menor que 5 mm ou separação (abertura) de 1 a 5 mm. | 10 |
| Descontinuidades contínuas com preenchimento macio de espessura maior que 5 mm ou separação maior que 5 mm. | 0 |

PARÂMETRO 5: Determinação do valor associado às condições da água subterrânea (Bieniawski, 1989 apud Santos, 2015).

| | | | | | | |
|------------------|--|--------------------|-------|------------|-----------|-----------|
| Água Subterrânea | Influxo por 10m no comprimento do túnel (l/min) | Sem Valor | <10 | 10 a 25 | 25 a 125 | > 125 |
| | Pressão de água na junta/ σ principal maior | 0 | <0,1 | 0,1 a 0,2 | 0,2 a 0,5 | > 0,5 |
| | Condições Gerais | Completamente seco | Úmido | Encharcado | Gotejando | Com fluxo |
| Valor (P5) | | 15 | 10 | 7 | 4 | 0 |

PARÂMETRO 6 – FATOR DE AJUSTE: Efeito da orientação das descontinuidades (direção e mergulho) em obras civis (Bieniawski, 1989 apud Santos, 2015).

| Direção (strike) perpendicular em relação ao eixo do túnel | | | |
|--|--------------------|----------------------------------|--------------|
| Na direção de mergulho | | Contra a direção de mergulho | |
| 45° a 90° | 20° a 45° | 45° a 90° | 20° a 45° |
| Muito favorável | Favorável | Razoável | Desfavorável |
| Direção (strike) paralela em relação ao eixo do túnel | | Independente da direção (strike) | |
| 20° a 45° | 45° a 90° | 0° a 20° | |
| Razoável | Muito desfavorável | Razoável | |

| Orientações da direção e mergulho | | Muito favorável | Favorável | Razoável | Desfavorável | Muito desfavorável |
|-----------------------------------|----------------|-----------------|-----------|----------|--------------|--------------------|
| | Túneis e Minas | 0 | -2 | -5 | -10 | -12 |
| Valor | Fundações | 0 | -2 | -7 | -15 | -25 |
| | Taludes | 0 | -5 | -25 | -50 | -60 |

CLASSIFICAÇÃO FINAL: Classificação final segundo o *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1989 apud Santos, 2015).

| | | | | | |
|---------------------------|-----------|-------|----------|-------|-------------|
| Valor | 100-81 | 80-61 | 60-41 | 40-21 | < 21 |
| Classe | I | II | III | IV | V |
| Descrição da rocha | Muito boa | Boa | Razoável | Pobre | Muito pobre |

ANEXO 2 – TABELAS DE REFERÊNCIA PARA A DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA Q

PARÂMETRO 1: Determinação do valor de J_n (Barton *et al.*, 1974 apud Santos, 2015).

| Condições de compartimentação do maciço | Valores de J_n |
|---|------------------|
| Fraturas esparsas ou ausentes | 0,5-1,0 |
| Uma família de fraturas | 2 |
| Uma família, mais fraturas esparsas | 3 |
| Duas famílias de fraturas | 4 |
| Duas famílias, mais fraturas esparsas | 6 |
| Três famílias de fraturas | 9 |
| Três famílias, mais fraturas esparsas | 12 |
| Quatro ou mais famílias de fraturas | 15 |
| Rocha triturada (completamente fragmentada) | 20 |

Classificação do tamanho dos blocos a partir do valor de J_n (Barton *et al.*, 1974 apud Santos, 2015).

| Denominação | J_n (descontinuidades/m ³) |
|-----------------------|---|
| Blocos muito grandes | < 1 |
| Blocos grandes | 1 a 3 |
| Blocos médios | 3 a 10 |
| Blocos pequenos | 10 a 30 |
| Blocos muito pequenos | 30 a 60 |
| Rocha triturada | > 60 |

PARÂMETRO 2: Determinação do valor de J_r (Barton *et al.*, 1974 apud Santos, 2015).

| a- fraturas sem deslocamento relativo. Contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas | |
|--|------------------|
| b- fraturas com deslocamento relativo (menos de 10 cm). Contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas | |
| Condições de rugosidade das paredes | Valores de J_r |
| A- Fraturas não-persistentes | 4 |
| B- Fraturas rugosas ou irregulares, onduladas | 3 |
| C- Fraturas lisas, onduladas | 2 |
| D- Fraturas polidas, onduladas | 1,5 |
| E- Fraturas rugosas ou irregulares, planas | 1,5 |
| Fraturas lisas, planas | 1 |
| G- Fraturas polidas ou estriadas, planas | 0,5 |
| c- fraturas com deslocamento relativo. Não há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas | |
| H- Fraturas com minerais argilosos | 1 |
| I- Zonas esmagadas | 1 |

PARÂMETRO 3: Determinação do valor de J_a (Barton *et al.*, 1974 apud Santos, 2015).

| a-Fraturas sem deslocamento relativo. Há contato rocha-rocha entre paredes das fraturas | |
|---|------------------|
| Condição de alteração das paredes | Valores de J_a |
| A- Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epidoto) | 0,75 |
| B- Paredes sem alteração, somente leve descoloração $\phi_r=25-30^\circ$ | 1 |
| C- Paredes levemente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não argilosas $\phi=20-25^\circ$ | 2 |
| D- Paredes com películas siltosas ou areno-argilosas $\phi=20-25^\circ$ | 3 |
| E- Paredes com películas de materiais moles ou com baixo ângulo de atrito (caolinita, clorita, talco, grafita, etc) e pequena quantidade de minerais expansivos $\phi=8-16^\circ$ | 4 |

| b- Fraturas com deslocamento relativo (menos de 10 cm). Há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas | |
|---|--------------------------|
| F- Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas, sem argila $\phi=25-35^\circ$ | 4 |
| G- Fraturas com preenchimento argiloso sobreconsolidado (espessura < 5 mm) $\phi=16-24^\circ$ | 6 |
| H- Fraturas com preenchimento argiloso subconsolidado (espessura < 5 mm) $\phi=12-16^\circ$ | 8 |
| I- Fraturas com preenchimento argiloso expansivo (espessura < 5 mm) $\phi=12-16^\circ$ | 8 a 12 |
| c- Fraturas com deslocamento relativo. Não há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas | |
| J,K,L- Zonas com rochas trituradas ou esmagadas, com argila (ver G, H, I para condições do material argiloso) $\phi=6-24^\circ$ | 6 a 8 ou 8 a 12 |
| M- Zonas siltsas ou areno-argilosas com pequena quantidade de argila | 5 |
| N,O,P- Zonas ou bandas contínuas de argila (ver g, h, i para condições de material argiloso) $\phi=6-24^\circ$ | 10 a 13 ou 13 a 20 |

PARÂMETRO 4: Determinação do valor de J_w (Barton *et al.*, 1974).

| Condição de água | J_w | Pressão de água (Kg/cm ²) |
|--|----------|---------------------------------------|
| A-Escavação a seco ou com pequena afluência de água (<5l/m) | 1 | <1 |
| B-Afluência média da água com lavagem ocasional do preenchimento das fraturas | 0,66 | 1,0 a 2,5 |
| C-Afluência elevada em rochas competentes, sem preenchimento das descontinuidades | 0,5 | 2,5 a 10 |
| D-Afluência elevada com considerável lavagem do preenchimento das fraturas | 0,33 | 2,5 a 10 |
| E-Afluência excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão), decaindo com o tempo | 0,2-0,1 | >10 |
| F-Afluência excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão), sem decaimento com o tempo | 0,1-0,05 | >10 |

PARÂMETRO 5: Determinação do valor de SRF (Barton *et al.*, 1974).





| a- Zonas alteradas | |
|---|------------|
| Condições das tensões dos maciços | SRF |
| A- Ocorrência de múltiplas zonas alteradas contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade qualquer) | 10 |
| B- Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade da escavação $\leq 50\text{m}$) | 5 |
| C- Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade da escavação $> 50\text{m}$) | 2,5 |
| D- Múltiplas zonas esmagadas em rocha competente, sem argila (profundidade qualquer) | 7,5 |
| E- Zona esmagada em rocha competente, sem argila (profundidade da escavação $\leq 50\text{m}$) | 5 |
| F- Zona esmagada em rocha competente, sem argila (profundidade da escavação $> 50\text{m}$) | 2,5 |
| G- Fraturas abertas, fraturamento muito intenso (profundidade qualquer) | 5 |
| b- Rocha competente, problemas de tensões de rochas | |
| H- Tensões baixas, próximas à superfície ($\sigma_c/\sigma_l < 200$) | 2,5 |
| I- Tensões médias ($\sigma_c/\sigma_l = 200$ a 10) | 1 |
| J- Tensões altas ($\sigma_c/\sigma_l < 10$ a 5) | 0,5 a 2,0 |
| K- Explosões moderadas de rochas ($\sigma_c/\sigma_l < 5$ a 2,5) | 5 a 10 |
| L- Explosões intensas de rochas ($\sigma_c/\sigma_l < 2,5$) | 10 a 20 |
| c- Rochas incompetentes (comportamento plástico devido aos tipos de deformações) | |
| M- Tensões moderadas | 5 a 10 |
| N- Tensões elevadas | 10 a 20 |
| d- Rochas expansivas (atividade expansiva na presença de água) | |
| O- Pressão de expansão moderada | 5 a 10 |
| P- Pressão de expansão elevada | 10 a 15 |

CLASSIFICAÇÃO FINAL: Classificação final segundo o *Tunnelling Quality Index* (Q) (Barton *et al.*, 1974 apud Santos, 2015).

| Classe | Padrão geomecânico do maciço | Valores de Q |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|
| IX | Péssimo | 0,0001 a 0,01 |
| VIII | Extremamente ruim | 0,01 a 0,1 |
| VII | Muito ruim | 0,1 a 1,0 |
| VI | Ruim | 1,0 a 4,0 |
| V | Regular | 4,0 a 10,0 |
| IV | Bom | 10,0 a 40,0 |
| III | Muito Bom | 40,0 a 100,0 |
| II | Ótimo | 100,0 a 400,0 |
| I | Excelente | >400,0 |

ANEXO 3 – TABELAS DE REFERÊNCIA PARA A DEFINIÇÃO DO GSI

Ábaco para a determinação do GSI (Hoek e Brown, 1997).

| <p style="font-size: 1.2em; margin: 0;">GSI</p> <p style="margin: 5px 0;">Com base nos códigos de letras que descrevem a estrutura e as condições da superfície do maciço rochoso, determine a caixa apropriada nesta tabela. Deve-se estimar o valor médio do índice GSI pelos contornos. Não tente ser muito preciso, estabelecer um intervalo GSI de 36 - 42, é mais realista do que afirmar que o GSI = 38.</p> | <p style="margin: 0;">MUITO BOM Superfícies muito ásperas, rocha sã, sem alteração</p> <p style="margin: 0;">BOM Superfícies ásperas, ligeiramente intemperizadas, podendo ocorrer manchas ferruginosas</p> <p style="margin: 0;">RAZOÁVEL Superfícies lisas, moderadamente alterada e/ou intemperizada</p> <p style="margin: 0;">RUIM - Superfícies estriadas, altamente intemperizadas com revestimentos compactos ou preenchimento por fragmentos angulosos</p> <p style="margin: 0;">MUITO RUIM - Superfícies estriadas, altamente intemperizadas, revestidas ou preenchidas por argila mole</p> |
|--|---|
| <p style="margin: 0;">ESTRUTURA</p> | <p style="margin: 0;">DIMINUIÇÃO DA QUALIDADE DA SUPERFÍCIE ➤</p> |
| <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;">  <p style="font-size: 0.8em; margin: 0;">Em blocos - maciço rochoso com pedregalhos muito bem interconectados e não-perturbados, constituído por blocos cúbicos formados por três conjuntos de descontinuidades ortogonais</p> </div> | <p style="margin: 0;">80</p> <p style="margin: 0;">70</p> |
| <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;">  <p style="font-size: 0.8em; margin: 0;">Muitos blocos interconectados - maciço rochoso parcialmente perturbado com blocos angulares multifacetados formados por quatro ou mais conjuntos de descontinuidades</p> </div> | <p style="margin: 0;">60</p> <p style="margin: 0;">50</p> |
| <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;">  <p style="font-size: 0.8em; margin: 0;">Em blocos/"caótico" - dobrado e/ou com falhas, blocos angulosos formados por muitos conjuntos de descontinuidades que se interceptam</p> </div> | <p style="margin: 0;">40</p> <p style="margin: 0;">30</p> |
| <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;">  <p style="font-size: 0.8em; margin: 0;">Desintegrado - blocos pobremente interconectados, maciço rochoso bastante fragmentado com mistura de rochas com pedregalhos angulosos e/ou arredondados</p> </div> | <p style="margin: 0;">20</p> <p style="margin: 0;">10</p> |

ANEXO 4 – TABELAS DE REFERÊNCIA PARA A DEFINIÇÃO DO RQD

Classificação da qualidade de maciços rochosos por meio do índice RQD (Deere *et al.*, 1967 apud Santos, 2015).

| RDQ (%) | Qualidade da rocha |
|----------------|---------------------------|
| < 25 | Muito ruim |
| 25 a 50 | Ruim |
| 50 a 75 | Razoável |
| 75 a 90 | Bom |
| 90 a 100 | Excelente |

Classificação da contagem volumétrica de juntas segundo Palmström (1996) apud Santos (2015).

| Termo para descontinuidades | Termo para J_v | Valores de J_v |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Sem descontinuidades | Extremamente baixo | < 0,3 |
| Muito pouco descontínuo | Muito baixo | 0,3 – 1,0 |
| Pouco descontínuo | Baixo | 1 – 3 |
| Moderadamente descontínuo | Moderadamente alto | 3 – 10 |
| Muito descontínuo | Alto | 10 – 30 |
| Bastante descontínuo | Muito alto | 30 – 100 |
| Extremamente descontínuo | Extremamente alto | >100 |