

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E MATERIAIS – PPGE3M

**UTILIZAÇÃO DA PERFILAGEM ÓPTICA E VELOCIDADE DE ONDA
COMPRESSIONAL ULTRASSÔNICA PARA CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA**

NEI BONGIORNI ALFF DE FREITAS

Dissertação de Mestrado para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 2019

Nei Bongiorno Alff de Freitas

**UTILIZAÇÃO DA PERFILAGEM ÓPTICA E VELOCIDADE DE ONDA
COMPRESSIONAL ULTRASSÔNICA PARA CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral.

Orientação: Prof. Dr. André Cezar Zingano

Porto Alegre, 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-reitor: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Vice-Coordenador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Freitas, Nei Bongiorno Alff de
Utilização da Perfilagem Óptica e Velocidade de
Onda Compressional Ultrassônica para Classificação
Geomecânica / Nei Bongiorno Alff de Freitas. -- 2019.
120 f.
Orientador: André Cezar Zingano.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Métodos Indiretos. 2. Televisionamento Óptico.
3. Métodos Ultrassônicos. 4. Classificação
Geomecânica. I. Cezar Zingano, André, orient. II.
Título.

Nei Bongiorno Alff de Freitas

Engenheiro de Minas

**UTILIZAÇÃO DA PERFILAGEM ÓPTICA E VELOCIDADE DE ONDA
COMPRESSIONAL ULTRASSÔNICA PARA CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA**

Aprovada em 10 de junho de 2019

Prof. Dr. André Cezar Zingano – Orientador

Prof. Dr. Paulo Salvadoretti

Prof. Dr. Jorge Dariano Gavronski

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. André Cezar Zingano pela orientação, por apoiar o tema escolhido e pela amizade.

Ao Prof. Dr. Paulo Salvadoretti pelo apoio, sugestões e disponibilidade prestada sempre auxiliando na melhora do trabalho.

Aos colegas José Guilherme Dantas Mourão, Igor Almeida Sampaio e George Gasper do Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro, pela colaboração prestada e amizade.

Aos colegas do laboratório de mecânica das rochas pelo apoio prestado e amizade.

À minha família, em especial aos meus pais professores, por acreditar no valor da educação e como esta pode mudar histórias.

À empresa Nexa Resources pelo apoio na realização dos trabalhos e pela infraestrutura oferecida na obtenção dos dados litológicos e geofísicos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES pela bolsa concedida.

RESUMO

Esta dissertação aplicou um método de classificação geomecânica indireto, alternativo ao que é comumente utilizado no mercado (método direto) a fim de explorar sua aplicabilidade e comparações entre eles. Os parâmetros: *Rock Quality Designation* (RQD), resistência à compressão, espaçamento das fraturas, condições das descontinuidades e o fluxo de água subterrânea foram utilizados para compor os pesos da classificação geomecânica (*Rock Mass Rating – RMR*) para os métodos aplicados. Para o método direto, os pesos da classificação RMR foram obtidos por meio dos testemunhos de sondagem e do uso de martelo de Schmidt, enquanto que para o método indireto os dados foram originados com a perfilagem geofísica (sonda de televisionamento óptico) e com as medições da velocidade da onda ultrassônica em corpos de prova. O resultado final apresentou semelhança entre os valores do *Rock Mass Rating* para o método indireto e os obtidos pelo método tradicional, porém aquele apresenta valores maiores devido às condições ambientais durante a obtenção dos dados. Tais resultados são esperados pois as imagens dos furos apresentam menos descontinuidades que nos testemunhos de rocha –estes apresentam maior quantidade das fraturas induzidas, ou que se encontravam fechadas no maciço rochoso – as quais são levadas em consideração para compor o resultado, penalizando o maciço rochoso. Dentro deste trabalho também foi estudada uma curva de correlação entre a velocidade da onda primária das rochas intactas e a resistência à compressão da rocha com litologia e textura semelhantes, as quais apresentaram um coeficiente de determinação (R^2) de 0,68 para o maciço rochoso. O método indireto de televisionamento óptico apresenta algumas vantagens como: maior velocidade na aquisição dos dados, menor custo, recuperação completa do furo, abertura das descontinuidades e contato litológico; em contraposição existem algumas dificuldades em identificar algumas descontinuidades (naturais e fechadas), grau de alteração e o tipo de rocha, que compõem alguns dos parâmetros que impactam na Classificação Geomecânica *Rock Mass Rating*. Quanto ao método ultrassônico é necessário calibrar o equipamento para cada tipo de rocha observada ou para combinações de rocha que compõem o maciço. Por fim, os métodos indiretos empregados mostraram-se satisfatórios na classificação geomecânica já que em menor tempo e custo foi obtido um valor do *Rock Mass Rating*. A utilização da perfilagem geofísica requer padronização das descrições das imagens e calibração da curva de regressão entre a resistência à compressão e velocidade da onda P, mostrando ainda uma interdependência entre a perfilagem geofísica e os testemunhos de rocha.

Palavras-Chave: Métodos Indiretos. Televisionamento Óptico. Métodos Ultrassônicos. Classificação Geomecânica.

ABSTRACT

This dissertation applied a method of indirect geomechanical classification, alternative to what is commonly used in the market (direct method) in order to explore its applicability and make comparisons of the results between them. The Rock Quality Designation parameters, compression strength, fracture spacing, discontinuity conditions and groundwater flow were used to compose the Rock Mass Rating (RMR) weights for both methods. The RMR values for the direct method was obtained by means of Schmidt hammer test and core sample analysis, while the indirect method was based on bore image data (optical televiewer logging) and ultrasonic wave velocity measurements on specimens. The final result presented a synchronism between the Rock Mass Rating values for the indirect method and those obtained by the traditional method, but the one presents higher values due to the environmental conditions in the data collection. The classification obtained is expected because the images of the boreholes have less discontinuities than in the core logs – because they present a greater amount of the induced fractures, or that were closed in the rock mass – which are taken into consideration to compose the result, penalizing the rock mass. This research also explored the regression analysis between the primary wave velocity (inverse of the transit time) of the intact rocks and the rock compression strength of the rocks with similar lithology and texture, which presented a correlation coefficient of 0,68. The indirect method of optical televiewer presents some advantages such as: speed of data acquisition, lower cost, complete recovery of the hole, opening of discontinuities and lithological contact; in contrast, there are some difficulties in identifying the rock itself, difficulties in identifying some discontinuities (natural and closed), degree of alteration, that compose some of the parameters that impact on the Rock Mass Rating Geomechanical Classification. As for the ultrasonic method it is necessary to calibrate the equipment for each type of rock observed or for combinations of rock that compose the rock mass. Finally, the indirect methods used proved to be satisfactory in the geomechanical classification since in a shorter time and cost a Rock Mass Rating value was obtained. Its use requires standardization of image descriptions and calibration of the regression curve between compressive strength and P-wave velocity, also showing an interdependence between geophysical profiling and rock core samples.

Keywords: Indirect Methods. Optical Televiewer. Ultrasonic Methods. Geomechanical classification.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	5
RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	12
LISTA DE TABELAS.....	15
1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA.....	18
1.3 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	18
1.4 METODOLOGIA.....	19
1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	20
2 FUNDAMENTOS DA PERFILAGEM DE POÇO APLICADA A CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA.....	21
2.1 CARACTERÍSTICAS DOS MACIÇOS ROCHOSOS.....	21
2.2 COMPREENDENDO O MACIÇO COMO MATERIAL DE TRABALHO.....	22
2.2.1 Zonas estruturalmente semelhantes.....	22
2.2.2 Geologia.....	23
2.2.3 Rocha intacta.....	23
2.2.4 Descontinuidades.....	23
2.2.5 Alterações.....	24
2.2.6 Presença de água.....	24
2.2.7 Métodos de conhecimento do maciço rochoso.....	24
2.2.8 Determinação dos parâmetros analisados na classificação do maciço rochoso.....	26
2.2.8.1 Parâmetros geológicos.....	26
2.2.8.2 Descontinuidades.....	27
2.2.8.2.1 Orientação.....	27
2.2.8.2.2 Espaçamento entre as descontinuidades.....	28
2.2.8.2.3 Abertura e preenchimento das descontinuidades.....	29
2.2.8.2.4 Persistência ou continuidade.....	30
2.2.8.2.5 Rugosidade da parede da descontinuidade.....	30
2.2.8.2.6 Intemperismo.....	32

2.2.8.3	Parâmetros mecânicos	32
2.2.8.3.1	Resistência ao cisalhamento	33
2.2.8.3.2	Resistência à compressão	34
2.2.8.3.3	Resistência da parede da junta (<i>Joint Compressive Strenght</i>)	35
2.2.9	Classificação Geomecânica	36
2.2.9.1	Rock Quality Designation (RQD)	37
2.2.9.2	Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski	38
2.3	PERFILAGEM GEOFÍSICA DO FURO DE SONDA	42
2.3.1	Equipamentos utilizados	43
2.3.2	Ambiente do furo	44
2.3.3	Resolução vertical e profundidade de investigação	45
2.3.4	Perfil sônico	46
2.3.4.1	Tipos de onda	46
2.3.4.2	Relações matemáticas	47
2.3.4.3	Fatores que influenciam a velocidade nas rochas	48
2.3.5	Perfil Optical Televiwer	49
2.3.5.1	Condições de operação	51
2.3.6	Perfil Acoustic Televiwer	51
2.3.6.1	Condições de operação	52
2.3.6.2	Detecção de descontinuidades	53
2.3.6.3	Relação com propriedades elásticas	53
2.3.6.4	Relação com tensão do maciço	53
2.4	PERFILAGEM NA MEDIDA E ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS	
GEOMECÂNICOS		54
2.4.1	Estimativa de resistência à compressão por meio de perfilagem geofísica	54
2.4.1.1	Velocidade sônica	55
2.4.1.2	Módulos elásticos e densidade	57
2.4.1.3	Propriedades combinadas	58
2.4.2	Medidas dos parâmetros das descontinuidades	59
2.4.2.1	Presença, mergulho e orientação das descontinuidades	59
2.4.2.2	Características das descontinuidades	62
2.4.3	Classificações geomecânicas baseado em perfilagem	63
2.4.3.1	Sistema Rock Mass Rating (RMR)	64
3	METODOLOGIA.....	66
3.1	CLASSIFICAÇÃO POR AVALIAÇÃO DE TESTEMUNHOS DE SONDAGEM	66
3.2	CLASSIFICAÇÃO POR AVALIAÇÃO DE IMAGENS DE FUROS PERFILADOS.....	69

3.2.1	Rocha intacta	70
3.2.2	Descontinuidades	71
3.3	ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	75
3.3.1	Preparação dos corpos de prova.....	76
3.3.2	Seleção das amostras	77
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
4.1	ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ROCHA INTACTA	78
4.2	DESCRIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM	82
4.3	DESCRIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO FURO A PARTIR DE IMAGENS E COMPARAÇÃO COM CLASSIFICAÇÃO POR TESTEMUNHOS.....	86
4.3.1	Informações geológicas	87
4.3.2	Resistência à Compressão da rocha intacta.....	91
4.3.3	Descontinuidades	92
4.3.3.1	Dificuldades de identificação e interpretação das imagens	96
4.3.4	Comparação entre os métodos OPTV e Testemunho de Rochas	98
4.3.4.1	Descrição geológica	98
4.3.4.2	Parâmetros RMR.....	100
4.3.4.3	Reclassificação considerando RQD avaliado por imagens do televisionamento	103
4.4	AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA UTILIZADA PARA CLASSIFICAÇÃO NA DISSERTAÇÃO	107
4.5	PRINCIPAIS DIFERENÇAS NA COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS	108
5	CONCLUSÃO.....	110
5.1	TRABALHOS FUTUROS	111
5.1.1	Estudos <i>in situ</i> e combinação de perfilhadores	111
5.1.2	Impedância acústica na estimativa de resistência a compressão uniaxial	111
5.1.3	Análise cinemática	112
6.	REFERÊNCIAS	113
	APÊNDICE – Tabelas de Conversão RMR	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização de Caçapava do Sul, RS	17
Figura 2: Caixa com testemunhos provenientes de sondagem rotativa.	25
Figura 3: Definição de mergulho e direção de mergulho	28
Figura 4: Representação esquemática de descontinuidade a) fechada; b) aberta; e c) preenchida.....	29
Figura 5: Perfis de rugosidade e nomenclatura	31
Figura 6: a) Tensões atuantes num ensaio de resistência ao cisalhamento; b) gráfico da resistência ao cisalhamento pelo deslocamento.....	33
Figura 7: Gráfico da resistência a cisalhamento em função de diferentes tensões normais	34
Figura 8: Curva característica de tensão versus deformação.....	35
Figura 9: Correlação do recuo obtido com o martelo do tipo L e a resistência à compressão uniaxial da rocha.	36
Figura 10: Método de determinação do RQD.....	38
Figura 11: a) Guincho e notebook para o armazenamento de dados. b) Unidade de aquisição de dados. c) Veículo de transporte e detalhe do da aquisição de dados d) Sonda de perfilagem com cabo elétrico acoplado.....	44
Figura 12: Resolução vertical e profundidade de investigação para uma sonda com volume de investigação esférico.	45
Figura 13: Sonda sônica com um transmissor e dois receptores mostrando o caminho da onda sônica. A diferença entre o tempo de trânsito é medida pela diferença entre a chegada da onda nos receptores, correspondendo ao tempo de trânsito no estrado CD.	46
Figura 14: Deformações elásticas e movimentos de partículas do terreno associados a passagem de ondas compressionais.	47
Figura 15: Deformações elásticas e movimentos de partículas do terreno associados a passagem de ondas cisalhantes.	47
Figura 16: Sonda de Optical Televiwer.....	49
Figura 17: a) Exemplo de resultado de imagem obtida por sondagem de Optical Televiwer; b) Reconstrução de testemunho virtual a partir de imagens de parede do furo. ..	50
Figura 18: Conjunto de imagens obtido pelo perfil acústico: tempo de trânsito, amplitude, impedância acústica e imagem do tempo de trânsito e amplitude.....	51
Figura 19: Deformação do furo devido a tensões do maciço rochoso.	53

Figura 20: Curva de regressão entre resistência a compressão uniaxial e tempo de transito de onda.	56
Figura 21: Perfil de resistência de rocha gerado a partir de dados de velocidade de onda sônica	56
Figura 22: Curva de regressão entre a resistência à compressão e os módulos elásticos.	58
Figura 23: Registro do número de fraturas pela profundidade do furo pelo método tradicional (vermelho) e pelo método acústico (azul).	61
Figura 24: a) Furo virtualmente reconstituído mostrando medidas de mergulho, espessura e posição das coordenadas marcadas. b) Coordenadas consideradas para os cálculos.	62
Figura 25: Exemplo da identificação de rugosidade da fratura. Na imagem é possível identificar a abertura da fratura, sendo maior na mais rugosa	63
Figura 26: Seção do modelo de maciço classificado segundo o sistema RMR	65
Figura 27: Caixa de testemunhos com registro do trecho e recuperação obtidos.....	67
Figura 28: Exemplo de marcação de fratura em furos de Caçapava do Sul.	69
Figura 29: Perfis de rugosidade de Barton (1987) à esquerda, e adaptação dos perfis para aplicação em imagens de televisionamento à direita.....	72
Figura 30: Equipamento de medição de velocidade ultrassônica utilizado nos ensaios.	75
Figura 31: Correlação entre V_p e UCS para diferentes tipos de rochas.....	77
Figura 32: Amostras de arenito, conglomerado e ritmito, respectivamente	77
Figura 33: Curva de regressão entre velocidade de onda P e resistência à compressão para as litologias presentes nos furos.	79
Figura 34: Correlações obtidas para arenitos por diferentes autores.	80
Figura 35: Diferença de linhas de tendência para arenitos de diferentes granulometrias em correlação V_p x UCS	81
Figura 36: Caixas de testemunhos com separação por manobras em diferentes cores.	83
Figura 37: Qualidade quantitativa dos testemunhos de rocha dos furos 172 e 166 com a profundidade.	86
Figura 38: Imagem de OPTV e testemunho. Os bandamentos são as cores mais escuras em ritmito de textura fina.	87
Figura 39: Imagem de OPTV e testemunho. Estratificação do arenito.	88
Figura 40: Estimativa de resistência a compressão uniaxial comparada com medidas feitas com martelo de Schmidt para os dois furos estudados.	92

Figura 41: Fraturas mapeadas com o software WellCad.	93
Figura 42: Imagem de OPTV e testemunho. Presença de fratura vertical horizontal e com mergulho.....	94
Figura 43: Abertura de descontinuidades decorrentes da sondagem (furo 172).	97
Figura 44: Fraturas de difícil detecção, ou com atribuição subjetiva (Furo 166).....	97
Figura 45: Trecho do furo com problemas de registro devido a travamento da sonda (Furo 166).....	98
Figura 46: Comparativo de parâmetros componentes do RMR para o furo 166.....	100
Figura 47: Comparativo dos parâmetros componentes do RMR para o furo 172.	101
Figura 48: Trecho do furo 172 (testemunhos acima e imagens do mesmo segmento do OPTV abaixo) mostrando diferenças na presença de descontinuidades.	102
Figura 49: Comparativo dos parâmetros analisados pelos testemunhos e pelo imageamento óptico do furo 166. Fonte: autoria própria, 2018.....	104
Figura 50: Comparativo dos parâmetros analisados pelos testemunhos e pelo imageamento óptico do furo 172. Fonte: autoria própria, 2018.....	105
Figura 51: Comparação entre a classificação Geomecânica RMR dos testemunhos de rocha e o OPTV.....	106
Figura 52: Comparação entre os resultados RMR com a penalização do método indireto por fator de correção	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação do espaçamento de descontinuidade	29
Tabela 2: Classificação de aberturas.	30
Tabela 3: Classificação da persistência da descontinuidade.	30
Tabela 4: Classificação da qualidade do RQD de acordo com o seu percentual intacto	38
Tabela 5: Parâmetros quantitativos do RMR.....	40
Tabela 6: Diretrizes para a classificação da condição das descontinuidades.....	41
Tabela 7: Ajuste para a relação entre o mergulho das descontinuidades e a orientação da abertura.....	41
Tabela 8: Pesquisa desenvolvido por diversos autores para a estimativa da resistência à compressão.	55
Tabela 9: Exemplo de tabela de classificação de rocha intacta.	71
Tabela 10: Graus de alteração do maciço rochoso	71
Tabela 11: Classificação das aberturas das descontinuidades	73
Tabela 12: Caracterização do preenchimento	74
Tabela 13: Grau de Fraturamento.	74
Tabela 14: Coeficiente de correlação para cada tipo de arenito.	81
Tabela 15: Descrição dos testemunhos dos primeiros metros do furo 166 (células em azul representam valores calculados).....	84
Tabela 16: Composição do valor de RMR para cada trecho testemunhado (segmento do furo 166).....	85
Tabela 17: Descrição geológica do Furo 166	89
Tabela 18: Descrição geológica do furo 172.	90
Tabela 19: Descrição das descontinuidades a partir de imagens do OPTV (trecho do furo 166).....	95
Tabela 20: Composição do valor de RMR para cada trecho registrado no OPTV (segmento do furo 166).....	95
Tabela 21: Comparação da descrição feita por imagem e por testemunhos furo 166....	99
Tabela 22: Comparação da descrição feita por imagem e por testemunhos furo 172....	99
Tabela 23: Comparação do número de descontinuidades entre os furos analisados....	102
Tabela 24. Média da Classificação geomecânica entre os furos analisados.....	107
Tabela 25: Correlação de valores de resistência da rocha intacta.....	117

Tabela 26: Correlação de valores para RQD	117
Tabela 27: Correlação de valores para o espaçamento	118
Tabela 28: Correlação entre o RQD e o espaçamento das descontinuidades	118

1 INTRODUÇÃO

A classificação geomecânica é uma prática muito comum no estudo do comportamento mecânico das rochas para projetos de engenharia, no planejamento e segurança de mina ou construção civil. Para isso, diversas características físicas, mecânicas e geológicas são coletadas para se determinar como um maciço rochoso vai responder às condições de curto, médio e longo prazo, já que as estruturas civis necessitam de um maior fator de segurança por se tratar de estruturas permanentes e de maiores riscos. A fim de se quantificar e qualificar o maciço rochoso são utilizados os maiores números de informações possíveis, tais como: resistência à compressão da rocha, faturamento, orientação, frequência e persistência das descontinuidades, rugosidade dos contatos litológicos e presença ou ausência de água. Embora várias dessas medidas possam ser facilmente obtidas, muitas delas são demoradas e onerosas, sendo assim, métodos mais práticos ou indiretos têm se mostrado uma boa alternativa para o ganho de tempo e redução de custo.

Um dos métodos para classificação que mais tem despertado a atenção dos pesquisadores são os métodos de perfilagem geofísica, que apesar de serem métodos indiretos estão se destacando como uma ótima ferramenta adicional na caracterização de maciços rochosos. Esses métodos são empregados para se conhecer litologias em subsuperfície por meio das propriedades físicas das rochas ou com o televisionamento da parede do furo, bastante explorado na indústria do petróleo, ele se mostrou capaz de determinar dezenas de propriedades, dentre as quais algumas possuem aplicação direta na geomecânica, como: velocidade da onda sísmica, densidade da rocha, imagem acústica, imagem óptica. Todas essas auxiliam na caracterização do maciço rochoso com medidas precisas ou fornecem estimativas com bom grau de confiabilidade. Dentre os métodos existentes, os que possuem maior aplicação são as sondas de perfilagem sônica, densidade, *Optical Televiewer* e *Televiewer Acoustic*.

A partir desses conceitos pretende-se analisar diversas formas de empregar o uso da perfilagem geofísica na classificação geomecânica. Concomitante a esse objetivo, buscou-se estudar, também, como a resistência da rocha se relaciona com métodos geofísicos, em particular com a velocidade da onda P (Primária). Mas para isso, precisam ser comprovados a fim de se trazer confiança às estimativas e classificações geomecânicas obtidas.

A fim de se verificar a confiabilidade das estimativas por métodos indiretos, buscou-se através desta dissertação de mestrado, coletar os dados gerados pelo *Óptica Teviewer* e realizar comparações com resultados das classificações geomecânicas atualmente empregados. Em parceria com Nexa Resources, dois furos foram estudados, obtendo-se dados de perfilagem (imagens) e amostras físicas (testemunhos de sondagem). Além do valor científico, é esperado que tal trabalho forneça uma metodologia que possa ser aplicada no dia a dia da empresa, fornecendo valores e informações úteis da qualidade do maciço rochoso com segurança, praticidade e com economia.

1.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no município de Caçapava do Sul, porção centro-sul do Estado do Rio Grande do Sul. Mais especificamente do distrito mineiro conhecido como Minas do Camaquã. Em função dos episódios Vulcano-sedimentares, a região apresenta mineralizações de Cobre, Chumbo e Zinco.



Figura 1: Localização de Caçapava do Sul, RS

Fonte: imagem produzida com Google Earth[®], 2018

1.2 JUSTIFICATIVA

A caracterização dos maciços rochosos é parte fundamental nos trabalhos de mineração e obras civis nos estágios preliminares e ao longo de toda vida útil dos projetos, o que pode persistir por anos após o final do projeto. No entanto, os métodos tradicionais de caracterização do maciço rochoso apresentam características que tornam os trabalhos demorados e onerosos. O estudo sobre as descontinuidades, por exemplo, demanda a aquisição de testemunhos de sondagens ou das aberturas subterrâneas. Já a medida da resistência à compressão da rocha intacta pode ser limitada devido à exigência de corpos de prova com dimensão mínima, minuciosa preparação, alto custo de execução e poucas descontinuidades visíveis (GOKCEOGLU & ZORLU, 2004).

Em contrapartida, os métodos geofísicos de perfilagem têm se mostrado muito mais dinâmicos e com maior agilidade na obtenção das mesmas informações. Além disso, são ferramentas que gravam um volume elevado de informação com qualidade satisfatória.

Por esses motivos, a obtenção dos parâmetros para a classificação geomecânica, por meio da perfilagem geofísica, mostra-se atrativa por ser mais econômico e operacionalmente mais simples, o que justifica essa pesquisa.

1.3 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Os objetivos serão divididos em gerais e específicos, nos quais serão empregados equipamentos e recursos institucionais para a obtenção e coleta dos dados.

Objetivos gerais:

- I. Classificar geomecanicamente o maciço rochoso a partir dos parâmetros obtidos na Perfilagem *Optical Televiewer* e dados laboratoriais de forma a compará-lo com a classificação realizada no Laboratório de Pesquisa Mineral - UFRGS.

Objetivos específicos

- I. Com os ensaios laboratoriais é possível gerar a regressão entre a resistência à compressão das rochas e a velocidade de onda P, buscando um coeficiente de determinação elevado para as litologias presentes nos furos;
- II. Classificar o maciço rochoso, segundo o método *Rock Mass Rating*, a partir dos testemunhos – métodos diretos – e os dados obtidos na Perfilagem *Optical Televiewer* – métodos indiretos;
- III. Comparar as classificações geomecânicas avaliando pontos positivos, negativos e verificar a possibilidade de sua aplicabilidade em trabalhos futuros;
- IV. Buscar uma metodologia de trabalho própria que utilize Perfilagem Geofísica (*Óptica Televiewer*, Sônico) para classificação geomecânica.

1.4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram utilizadas pesquisas bibliográficas pesquisa de campo e de laboratório, além de um estudo de caso. A pesquisa bibliográfica baseou-se em publicações científicas na área da mecânica das rochas e da perfilagem geofísica. O estudo de caso foi desenvolvido em furos abertos para a pesquisa geotécnica.

A metodologia escolhida para alcançar os objetivos do trabalho consiste nas seguintes etapas:

- I. Revisão bibliográfica sobre classificação geomecânica *Rock Mass Rating* (RMR) e *Rock Quality Designation* (RQD);
- II. Coleta dos dados em campo através do uso de perfilador *Optical Televiewer* e os dados laboratorial com o PUNDIT;
- III. Determinação dos parâmetros do maciço rochoso;
- IV. Fazer o levantamento com o auxílio do *software Well Cad* sobre a posição, preenchimento e abertura das fraturas visíveis.
- V. Obter a curva de regressão entre a resistência à compressão com os ensaios uniaxial e a velocidade da onda P para as diferentes litologias.
- VI. Analisar os testemunhos de sondagem dos furos perfilados e classificá-los;
- VII. Utilizar os perfis geofísicos gerados pelo *Optical Televiewer* e classificá-los;
- VIII. Comparar as classificações geomecânicas obtidos para os dois métodos-testemunho de sondagem e os de Perfilagem Geofísica;

1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

- Capítulo 1: Apresentação do tema e dos objetivos propostos
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica abordando os principais métodos de classificação geomecânica, assim como os principais métodos de perfilagem utilizados e suas características e aplicações para a mecânica das rochas.
- Capítulo 3: Escolha dos corpos de prova a serem ensaiados; obtenção do banco de dados geofísico, classificação geomecânica através da análise dos testemunhos de rocha e dados de perfilagem. Obtenção da curva de regressão para a estimativa de resistência à compressão com os uniaxiais através da medição de onda P em laboratório.
- Capítulo 4: Análise dos resultados. Comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos. Principais diferenças na comparação entre os métodos.
- Capítulo 5: Conclusões obtidas ao longo do trabalho e sugestão para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS DA PERFILAGEM DE POÇO APLICADA A CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA

A fundamentação teórica será organizada da seguinte forma:

- Características dos maciços rochosos;
- Perfilagem geofísica de furo de sonda;
- Perfilagem na medida e estimativa dos parâmetros geomecânicos;
- Classificações geomecânicas baseadas na perfilagem.

2.1 CARACTERÍSTICAS DOS MACIÇOS ROCHOSOS

As características quantitativas e qualitativas dos maciços rochosos são fundamentais para a realização dos projetos de engenharia na mineração, na engenharia civil ou qualquer outra área que dependa do bom desempenho da rocha. O conhecimento dessas características garante segurança e planejamento adequado para os trabalhos com essas estruturas.

De acordo com Azevedo e Marques (2006) o maciço rochoso, como material de trabalho, é considerado estruturas bastante heterogêneas (anisotrópicas); por isso, compreender a sua formação geológica, o comportamento das descontinuidades e as propriedades das rochas e estruturas são essenciais para determinar a qualidade da estrutura localmente e como um todo (independentemente da escala estrutural).

No século XX, diversos pesquisadores procuraram formas de classificar o maciço rochoso, tendo sido criados vários sistemas de classificação como o RSR (WICKHAM *et al.*, 1972), RMR (BIENIAWSKI, 1976, 1989), Sistema-Q (BARTON *et al.*, 1974) e o GSI (HOEK & BROWN, 1994, 1995). Todos eles têm em comum a avaliação das características do maciço rochoso, que os quantificam numericamente as características que influenciam em sua qualidade.

Essas classificações servem para estimar como o maciço rochoso irá se comportar como material de trabalho. Dessa forma, é possível planejar parâmetros como melhor ângulo do talude, largura do túnel e galerias, tipo e dimensionamento do suporte, assim como determinar o fator de segurança com maior precisão para cada caso. Além disso, a qualidade vai

influenciar no método de lavra utilizado, ocorrência de subsidência, fragmentação, e pode até mesmo inviabilizar tecnicamente um projeto devido a falta de trabalhabilidade do maciço rochoso (BRADY e BROWN, 2006).

O maciço rochoso traz muitos desafios pela complexidade da geologia e altos custos na coleta das informações que o quantificam. Neste tópico é descrito o maciço rochoso e as principais estruturas e componentes, métodos de medição e de coleta de informação, assim como interpretação de todos esses dados e classificação geotécnica.

2.2 COMPREENDENDO O MACIÇO COMO MATERIAL DE TRABALHO

O maciço rochoso é uma formação natural composto por rochas e descontinuidades, essa série de elementos o faz ser uma estrutura bastante complexa de se trabalhar, sendo o seu entendimento fundamental para que seja utilizado como material de trabalho. De acordo com Brady e Brown (2006), o maciço rochoso é o meio *in situ* que contém planos de acamamento, falhas, juntas, dobramento e outras características estruturais e rocha intacta. Além da parte geométrica e geológica, o maciço rochoso incorpora a presença de água e o estado de tensões, tendo todos esses componentes influência direta no seu comportamento (AZEVEDO; MARQUES, 2006).

Devido a sua natureza geológica, ao longo de milhões de anos o maciço rochoso sofreu inúmeras ações mecânicas, térmicas e químicas, o que lhe confere característica bastante heterogêneas. O seu entendimento depende de uma espécie de investigação detalhada, na qual o maior número de informação precisa ser coletado.

O maciço rochoso apresenta diversos elementos que devem ser levados em consideração quando tratado como material de trabalho na engenharia. A seguir há a relação dos principais elementos:

2.2.1 Zonas estruturalmente semelhantes

Consistem em divisões do maciço rochoso com características semelhantes. Tal separação pode ser feita com base na geologia, grau de fraturamento, de alteração, etc, tudo isso visando separar regiões com propriedades semelhantes. Esses domínios podem ter sua separação estipulada por uma diferença litológica, mudança estrutural, presença de veio ou grau de intemperismo (DEMPERS *et al.*, 2010).

2.2.2 Geologia

O conhecimento da geologia é importante pois cada rocha apresenta propriedades particulares, o que influenciará diretamente na qualidade do maciço rochoso. Há rochas em um domínio litológico que são mais resistentes, outras mais susceptíveis a alterações químicas, faturamento, etc. Além disso, essa classificação é importante e poderá auxiliar na divisão de zonas com propriedades semelhantes.

2.2.3 Rocha intacta

Rocha intacta, por sua vez, é o material componente do maciço rochoso, constituído por minerais, e se apresenta em grande massa ou em fragmentos. É comum utilizar-se o termo matriz rochosa para tratar deste material (AZEVEDO; MARQUES, 2006). A Rocha é o material principal do maciço rochoso.

2.2.4 Descontinuidades

Descontinuidade é o termo utilizado em geologia de engenharia para todos os tipos de planos – que podem ocorrer em várias escalas - microfissuras, fissuras, juntas e planos de acamamento até falhas de extensão regional - resultantes da redução da resistência da rocha à tração e ao cisalhamento. As descontinuidades afetam a estabilidade do maciço, e se persistentes podem ser suficientes para desestabilizar taludes e escavações subterrâneas.

Os pontos de fraqueza podem se apresentar de diversas formas, como plano de acamamento, dobras, falhas, zona de cisalhamento, dique, juntas, veios.

2.2.5 Alterações

Alterações se dão principalmente na forma de intemperismo químico, onde a rocha alterada se torna mais frágil devido à perda de minerais. Zonas alteradas ou descontinuidades devem ser consideradas no entendimento do maciço rochoso como zonas mais fracas e, portanto, não podem ser negligenciadas (BRADY e BROWN, 2006).

2.2.6 Presença de água

A presença de água produz vários efeitos indesejáveis às rochas e ao maciço rochoso. Ela diminui a resistência da rocha, e causa seu enfraquecimento, seja por intemperismo, diminuição da coesão entre os minerais, já que a água subterrânea age como lubrificante entre os minerais que formam as rochas ou por expansão das fraturas por exercer uma pressão neutra nas fraturas em determinados casos.

A presença de água nas fraturas causa uma pressão nas descontinuidades que acaba por reduzir a tensão normal e também ocorre a diminuição ângulo de atrito, facilitando movimentações por cisalhamento. Além disso, por ela transitar entre as descontinuidades ela lixivia as rochas e também pode depositar materiais expansivos que aumentam as fraturas. Ela também causa aumento de fraturas em regiões que possibilitam o congelamento dela, ocorrendo o intemperismo mecânico.

2.2.7 Métodos de conhecimento do maciço rochoso

Para se obter as informações geomecânicas sobre o maciço é preciso ter acesso a ele, seja de maneira direta, onde o engenheiro geológico, de minas ou geólogo tem contato com os testemunhos de rocha, ou de maneira indireta por meio do uso da perfilagem geofísica.

Os métodos diretos mais comuns são a análise de testemunhos de sondagens e a análise em abertura de exploração (trincheiras e canais) pelo método de *scanline*. Já os métodos indiretos geofísicos como perfilagem geofísica de furos, sísmica de reflexão e refração, entre outros. Essas informações devem ser referenciadas para composição do banco de dados.

A sondagem consiste da realização de um furo e a recuperação do perfil litológico perfurado. A sondagem é feita com broca rotativa diamantada, na qual o maciço rochoso é armazenado dentro barrilhete. A cada manobra os testemunhos são colocados em caixas para serem catalogados (Figura 2). Todo esse procedimento é feito em estágios: perfuração, içamento do Barrilhete (*wire-line*), retirada dos testemunhos, colocação do barrilhete vazio e reinicia-se a perfuração.

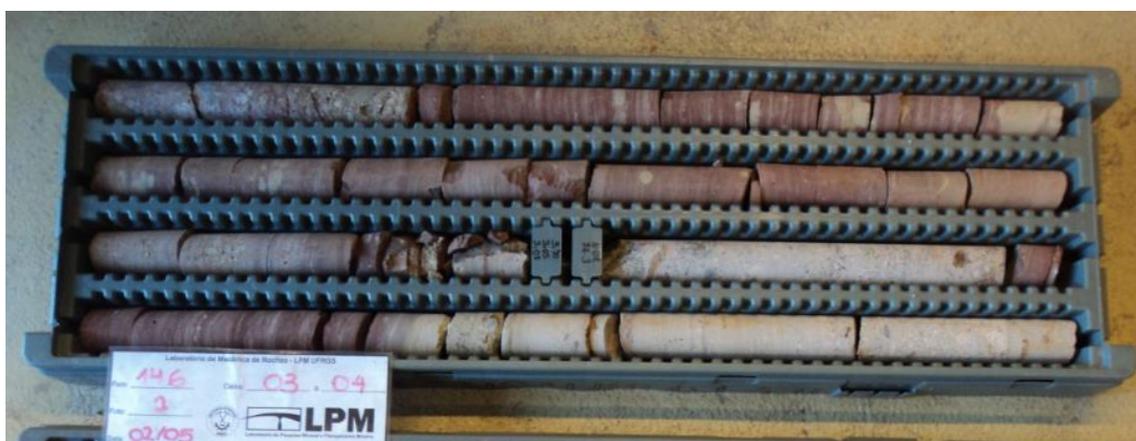


Figura 2: Caixa com testemunhos provenientes de sondagem rotativa.

Fonte: Autoria Própria, Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro LPM – UFRGS

Esse método é bastante importante pois apresenta uma prova física, o corpo de prova, da litologia da região, isso permite que se retirem inúmeros parâmetros: descrição litológica com espessuras; diversas características das discontinuidades (espaçamento, JRC, alteração, JCS), se a sondagem for orientada é possível, ainda, fazer o registro do ângulo de mergulho e direção das discontinuidades; resistência à compressão, ensaio de tração, velocidade de onda entre outros. Sendo nesses casos o mais importante a determinação das zonas mineralizadas e teor.

Apesar da vantagem de se obter uma amostra física da região, esse método é bastante caro devido maquinário, pessoal, tempo de treinamento e tempo operacional que é necessário para se obter os testemunhos de todo o furo. Além disso ele não representa fielmente a

posição estratigráfica, informação crucial na mineração, pois quando os testemunhos são retirados eles sofrem mudanças inerentes ao método como: perda de rocha nas zonas fraturadas com baixa recuperação; mudança nas tensões, fraturas induzidas, falta de orientação no furo e *artifacts*. Os testemunhos recuperados representam, de modo geral, a parte mais resistente do maciço rochoso.

2.2.8 Determinação dos parâmetros analisados na classificação do maciço rochoso

De acordo com Brady e Brown (2006), há uma série de parâmetros básicos que devem ser levados em conta ao se descrever um maciço rochoso do ponto de vista da classificação geomecânica. Tais informações, medições e descrições são importantes pois irão contribuir para se determinar a qualidade do maciço rochoso para a engenharia.

Hoek e Brown (1980) sugerem como método de conhecimento do maciço rochoso a seguinte divisão de etapas:

1. Caracterização Geológica
2. Características estruturais do maciço (espessura de camadas, espaçamento entre fraturas, rugosidade da parede da fratura, direção e mergulho das descontinuidades, etc)
3. Características mecânicas (resistência à compressão, ângulo de atrito das descontinuidades, etc.)

2.2.8.1 Parâmetros geológicos

Consiste na descrição da geologia, de um ponto de vista local como também regional. Descrições locais permitem saber com qual tipo de rocha está trabalhando, o que fornece uma noção prévia de suas principais características, como sua resistência mecânica, planos de fraquezas, entre outros. Já do ponto de vista regional, a informação que se busca é a história geológica da região, na qual fornecerá conhecimento tanto das litologias quanto das características estruturais principais (dobramentos, falhas, diques) presente na região.

Esse histórico é importante, mas somente ele não é o suficiente, é necessário o mapeamento da superfície, e investigações subterrâneas através dos furos de sondagem testemunhados e perfilagens. Tais informações complementares contribuirão para um melhor entendimento geológico da região de trabalho.

2.2.8.2 Descontinuidades

Certamente as descontinuidades são um fator chave no entendimento do maciço rochoso. O termo descontinuidades é utilizado de forma geral para descrever qualquer plano de fraqueza como juntas, falhas, regiões de cisalhamento, planos de acamamentos, todos com praticamente com pouca ou nenhuma resistência ao cisalhamento e nenhuma coesão (BRADY E BROWN, 2006). Dessa forma, todas as formas de manifestação das descontinuidades devem ser levadas em consideração.

2.2.8.2.1 Orientação

A orientação é definida pelos valores dos ângulos de mergulho e direção do mergulho ou azimute da descontinuidade. Em outras palavras, caracteriza a inclinação do plano no espaço de forma referenciada. O ângulo de mergulho é medida de 0 a 90° a partir da horizontal, já a direção do mergulho é medida em sentido horário a partir do norte verdadeiro. Alguns grupos preferem trabalhar com azimute, que corresponde a direção de mergulho diminuído de 90°.

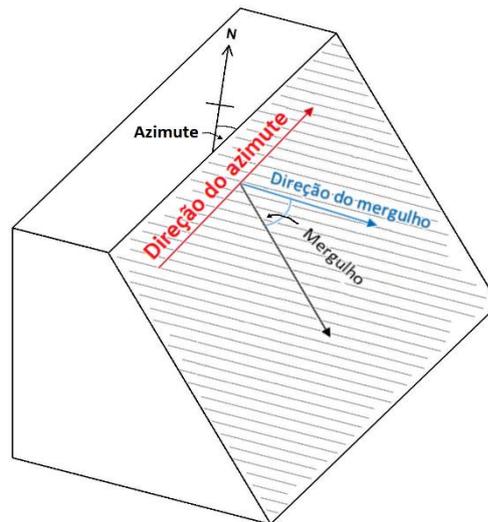


Figura 3: Definição de mergulho e direção de mergulho

Fonte: Marques e Marques, 2006.

Para os propósitos da mecânica das rochas, informações da orientação das fraturas são importante para prever efeitos potenciais de rupturas como queda de blocos, deslizamentos e tombamentos.

2.2.8.2.2 Espaçamento entre as descontinuidades

Consiste na distância entre descontinuidades adjacentes, a qual geralmente é expressa como a média do espaçamento de um conjunto de juntas. O espaçamento das descontinuidades determina o tamanho dos blocos que compõem o maciço rochoso. Constitui um parâmetro que está intimamente relacionado ao tamanho da escavação e ao mecanismo de deformação e ruptura (BRANDY e BROWN, 2006). Também é um parâmetro útil para se determinar permeabilidade, fragmentação e abatimento de blocos.

Sua medição é feita considerando a distância perpendicular entre as famílias de fraturas ou ter sua conversão feita de acordo com a (Equação 1).

$$S = \frac{L \operatorname{sen}(\alpha)}{N''} \quad (\text{Equação 1})$$

S = Espaçamento médio entre descontinuidades

L = Distância do trecho analisado

α = Ângulo que a fratura faz com a linha de medição

N'' = Número de descontinuidades medidos

Assim como outras características das rochas, o espaçamento das descontinuidades não possui um único valor, tendo sua representação melhor feita na forma de uma faixa de valores de acordo com sua distribuição probabilística (PRIEST e HUDSON, 1976).

Tabela 1: Classificação do espaçamento de descontinuidade

Descrição	Espaçamento (mm)
Espaçamento extremamente próximo	<20
Espaçamento muito próximo	20-60
Espaçamento próximo	60-200
Espaçamento médio	200-600
Espaçamento grande	600-2000
Espaçamento muito grande	2000-6000
Espaçamento extremamente grande	> 6000

Fonte: Brandy e Brown, 2006.

2.2.8.2.3 Abertura e preenchimento das descontinuidades

Abertura é a medida da separação entre as descontinuidades, a qual está ocupada por água, ar ou preenchimento com material sólido. preenchimento é o termo usado quando há material preenchendo os espaços das descontinuidades, podendo ser inúmeros materiais como: calcita, argila, quartzo. A abertura pode influenciar na porosidade, diminuição da resistência ao cisalhamento e ângulo de atrito. Já o preenchimento apresenta influência variável dependendo do tipo de material presente, podendo causar maior ou menor coesão no contato entre as rochas. A Figura 4 apresenta um esquema das descontinuidades fechada, aberta e preenchida.

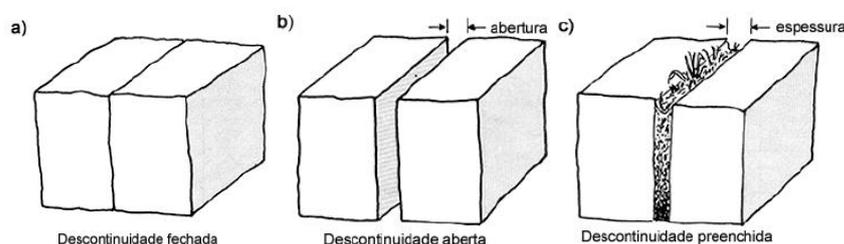


Figura 4: Representação esquemática de descontinuidade a) fechada; b) aberta; e c) preenchida

Fonte: Brandy e Brown, 2006.

A abertura pode ser classificada de acordo com a tabela abaixo:

Tabela 2: Classificação de aberturas.

Designação	Abertura (mm)
Muito fechadas	< 0,1
Fechadas	0,1 - 0,25
Parcialmente fechadas	0,25 - 0,5
Abertas	0,5 - 2,5
Largas	2,5 – 10
Muito largas	10 – 100
Extremamente largas	100 – 1000
Cavernosas	> 1000

Fonte: Brandy e Brown, 2006.

2.2.8.2.4 Persistência ou continuidade

Persistência ou continuidade é a medida do quanto uma descontinuidade se estende ao longo de um plano. Geralmente é medido em faces expostas da rocha. É um dos mais importantes parâmetros, porém um dos mais difíceis de se determinar. Sua importância está ligada a tensão de cisalhamento, permeabilidade, e possibilidades de fragmentação e de ocorrência de abatimento de blocos (BRADY e BROWN, 2006). Caso uma família de descontinuidade não seja persistente existe entre as fraturas a ponte rochosa.

Tabela 3: Classificação da persistência da descontinuidade.

Descrição	Comprimento (m)
Muito baixa persistência	<1
Baixa persistência	1-3
Persistência média	3-10
Alta persistência	10-20
Muito alta persistência	20

Fonte: Brandy e Brown, 2006.

2.2.8.2.5 Rugosidade da parede da descontinuidade

Rugosidade é a característica de desigualdade produzida por ondulações relativas ao plano médio da superfície de uma junta. A rugosidade das descontinuidades tem influência direta na tensão de cisalhamento e no ângulo de atrito das superfícies, se as superfícies estão limpas e fechadas, inibem o movimento de cisalhamento ao longo da superfície das juntas. É importante notar ainda que ela pode assumir valores distintos de acordo com a direção de

trabalho analisada. Esse parâmetro, porém, perde importância com o aumento da abertura entre as faces ou devido ao preenchimento com algum material.

Para padronizar a descrição desse parâmetro, a comissão do ISRM em 1978 desenvolveu uma série de perfis de rugosidade com a respectiva nomenclatura. Ela é dividida em três tipos (patamar, ondular e planar), de três graus (rugosa, lisa, espelhada), e ainda pode ser considerada em diferentes escalas de observação, pequena (alguns centímetros) e grande (vários metros).

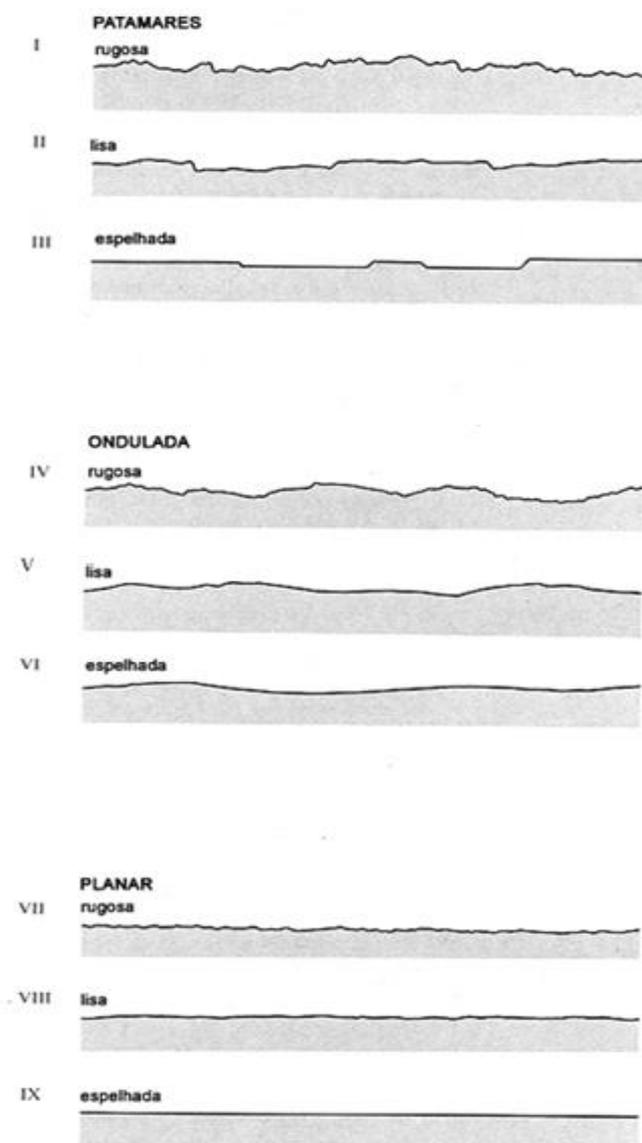


Figura 5: Perfis de rugosidade e nomenclatura

Fonte: ISRM, 1978.

2.2.8.2.6 Intemperismo

A alteração da rocha ocorre nas áreas expostas a ações de fluidos e também por processos físicos. Isso afeta principalmente as descontinuidades, o que causa uma diminuição de resistência ao cisalhamento com relação ao restante da rocha intacta. A identificação da alteração ocorre por análise visual da descontinuidade.

A perda de resistência que ocorre nesses pontos pode ser estimada pelo uso de martelo de Schmidt (ISRM, 1981).

O intemperismo pode ser classificado de acordo com as classes e os critérios propostos pelo ISRM (1978):

- I. Não intemperizada ou rocha sã. Sem sinais visíveis de desgaste;
- II. Ligeiramente intemperizada. As descontinuidades são manchadas ou descoloridas e podem conter preenchimento de material fino alterado. A descoloração pode se estender das superfícies de descontinuidades da rocha a uma distância de até 20% do espaçamento das descontinuidades.
- III. Moderadamente intemperizada. Leve descoloração estende-se desde os planos de descontinuidades à distância maior que 20% do espaçamento das descontinuidades. As descontinuidades podem conter preenchimento de material alterado. Abertura parcial dos limites de grãos podem ser observados.
- IV. Altamente intemperizada. A descoloração se estende por toda a rocha, e o material da rocha é em parte friável. A textura original da rocha se mantém preservada, mas ocorre a separação dos grãos.
- V. Muito alterada. A rocha é totalmente descolorida e decomposta, com uma estrutura friável.

2.2.8.3 Parâmetros mecânicos

Esses parâmetros visam determinar qual seria o comportamento da rocha nas condições de trabalho. Para isso são considerados os principais esforços que o maciço rochoso sofre, como compressão, tração, cisalhamento, assim como combinações desses.

Nesse item serão descritos os principais parâmetros, bem como seus ensaios, que apresentam maior importância na classificação das rochas.

2.2.8.3.1 Resistência ao cisalhamento

Esse parâmetro é medido visando-se determinar a resistência ao deslizamento das descontinuidades das rochas. O ensaio é feito aplicando uma tensão normal ($\sigma_n = N/A$) perpendicular ao contato das rochas e se determina a tensão de cisalhamento ($\tau = S/A$), aplicada horizontalmente a umas das partes, necessária para tirar as amostras do seu equilíbrio, conforme o esquema abaixo.

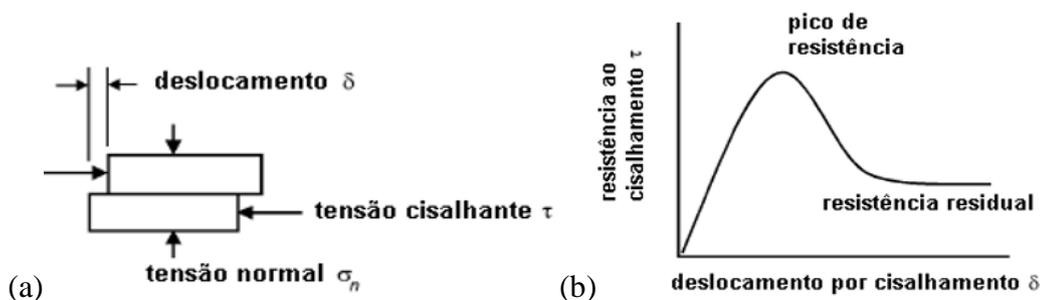


Figura 6: a) Tensões atuantes num ensaio de resistência ao cisalhamento; b) gráfico da resistência ao cisalhamento pelo deslocamento

Fonte: Hoek, 2007.

Ao se realizar medições para diferentes valores de tensão normal, se obterá um diagrama Resistência ao cisalhamento (τ) *versus* resistência à compressão (σ) na forma de uma reta $\tau = \sigma \tan\Phi + c$, onde o ângulo corresponde ao ângulo de atrito básico da descontinuidade e “c” a coesão do material (Figura 7).

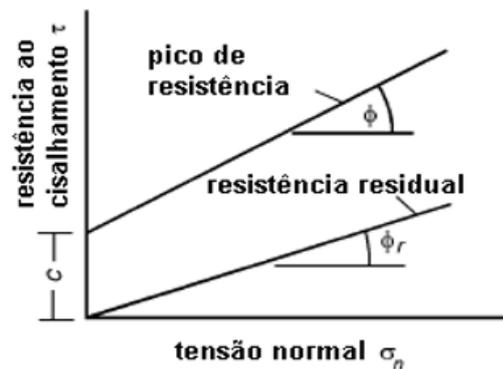


Figura 7: Gráfico da resistência a cisalhamento em função de diferentes tensões normais

Fonte: Hoek, 2007.

2.2.8.3.2 Resistência à compressão

Resistência à compressão é a capacidade que uma rocha tem de suportar tensões compressivas em um único eixo Figura 8a. Tal medida, foi normatizada pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e *International Society for Rock Mechanics* (ISRM). Sendo um dos métodos mais reconhecidos para se medir resistência à compressão da rocha.

O ensaio é realizado em laboratório, utilizando uma prensa hidráulica controlada que aumenta gradativamente a carga sobre a amostra até rompê-la. Para a realização do ensaio é necessário a preparação do corpo de prova cilíndrico, que deve ter uma relação diâmetro por altura de 2:1 a 2,5:1 e um diâmetro de 54mm. Durante o ensaio a prensa registra os valores de força normal aplicados e o deslocamento, com o auxílio de LVDT. Como resultado é gerado um gráfico de tensão por deformação conforme a Figura 8 b.

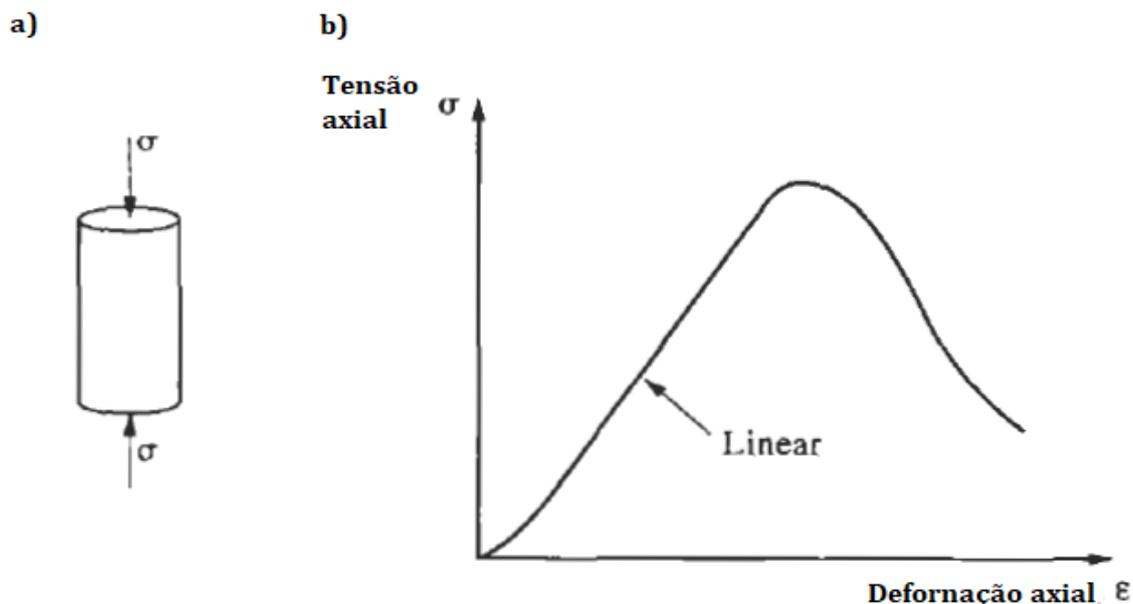


Figura 8: Curva característica de tensão versus deformação.

Fonte: Hudson e Harrison, 1997.

Com esse ensaio é possível obter ainda outras informações como o módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν). O módulo de Young é calculado pelo segmento linear da curva, correspondendo a razão entre tensão e a deformação, nesse trecho a amostra apresenta um comportamento elástico, ou seja, sua deformação é proporcional a tensão. Já o coeficiente de Poisson corresponde a deformação transversal sobre a longitudinal da amostra, ele só pode ser calculado com o auxílio de *strain gauges*, que são dispositivos soldados na amostra para medir a deformação horizontal e vertical.

2.2.8.3.3 Resistência da parede da junta (*Joint Compressive Strength*)

A resistência da parede da rocha ou das descontinuidades podem ser estimadas pelo uso de martelo de Schmidt. Esse instrumento consistem em uma massa normalizada que é disparada contra a rocha, e a partir da energia absorvida pela rocha na deformação plástica a massa retorna resultando numa escala de dureza. Essa escala tem uma regressão com a resistência à compressão da rocha conforme a figura abaixo. É importante mencionar que é necessário determinar a densidade da rocha como um outro parâmetro de determinação da resistência à compressão da rocha.

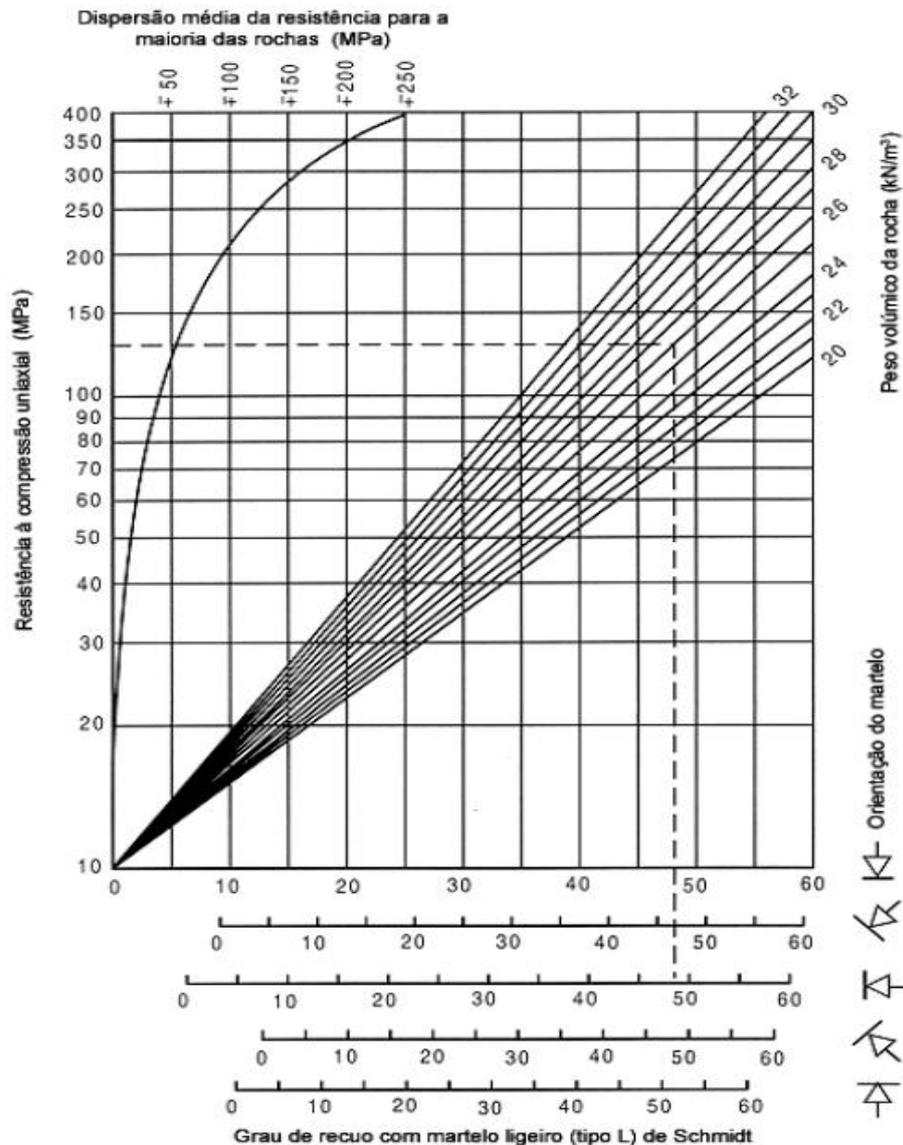


Figura 9: Correlação do recuo obtido com o martelo do tipo L e a resistência à compressão uniaxial da rocha.

Fonte: Hudson e Harrison, 1997.

2.2.9 Classificação Geomecânica

Diante das inúmeras informações que podem ser coletadas no maciço rochoso, diversos pesquisadores procuraram estabelecer classificações para que a interpretação dos dados fosse mais analítica e baseada na mecânica dos materiais do que subjetiva (BRADY e BROWN, 2006). Nesse sentido, diversas classificações foram desenvolvidas buscando designar valor numérico as propriedades e características do maciço rochoso que fossem considerados capazes de influenciar no comportamento da rocha, sendo a combinação de todos eles uma classificação razoável da zona analisada.

As classificações descritas nesse trabalho possuem no seu desenvolvimento, histórico de aplicações e testes em projetos ativos, os quais contribuíram para validá-las e aperfeiçoá-las. Apesar disso, frente a natureza do material, as classificações nem sempre avaliam inteiramente todos os aspectos dos problemas, devendo ser utilizadas com cuidado. Há casos ainda em que o comportamento das rochas apresenta grande complexidade, e nessas situações, decisões devem ser baseadas em experiências com trabalhos semelhantes (HOEK, 2007).

A seguir são descritos os principais métodos de classificações que contribuem para prever a qualidade do maciço rochoso.

2.2.9.1 Rock Quality Designation (RQD)

Para classificar as rochas de acordo com o espaçamento, Deere (1964, 1968, 1988) introduziu o conceito de *Rock Quality Designation* (RQD), que consiste numa classificação numérica para um testemunho de sondagem. Essa classificação é feita percorrendo os testemunhos de sondagem e somando os segmentos iguais ou maiores que 10 centímetros. Deve-se ter o cuidado ao desconsiderar as quebras mecânicas da sondagem para que não seja penalizado o cálculo. Os testemunhos devem ter no mínimo diâmetro igual a 54 milímetros. No contexto dessa discussão, o uso mais importante do RQD é como um componente do RMR e da classificação Q. O percentual RQD é calculado de acordo com a equação abaixo:

$$RQD = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{L} \quad (\text{Equação 2})$$

x_i = comprimento dos testemunhos maiores de 10cm;

L = Comprimento total da manobra medida.

O comprimento deve ser medido de ponta a ponta do testemunho, onde somente os segmentos intactos ao longo da linha central deverão ser medidos (Figura 10).

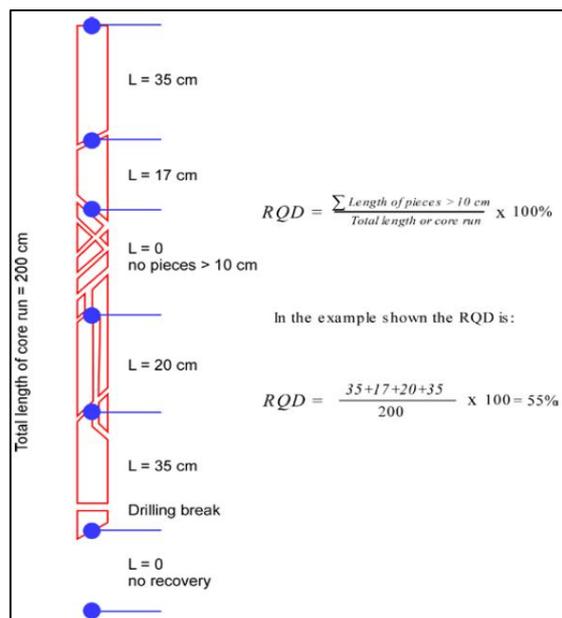


Figura 10: Método de determinação do RQD.

Fonte: Deere, 1968.

O percentual dessa soma em relação ao todo corresponde a classificação da rocha (Tabela 4).

Tabela 4: Classificação da qualidade do RQD de acordo com o seu percentual intacto

Qualidade da Rocha	RQD (%)	Descrição aproximada da rocha
Excelente	90-100	Rocha intacta
Boa	75-90	Inteira, moderadamente fraturada
Regular	50-75	Fraturada em blocos
Fraca	25-50	Fragmentada, muito fraturada
Muito fraca	0-25	Muito fragmentado

Fonte: Deere, 1968.

2.2.9.2 Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski

Bieniawski desenvolveu um sistema de classificação conhecido como RMR (Rock Mass Rating) em 1973 baseado na escavação de túneis. Esse sistema funciona na ideia de se atribuir pesos aos principais parâmetros que influenciam na estabilidade e resistência do maciço, resultando numa classificação que traduz o comportamento da rocha. Desde a sua criação até os dias atuais, o método passou por inúmeras atualizações para que fosse adaptado a outros tipos de rochas e a diferentes situações, sendo que a última modificação em 1989. O método ganhou aceitação por sua versatilidade, tendo sido empregado com eficiência em

túneis, galerias, taludes e fundações e com aplicação em mais 350 casos históricos. Apesar disso, é importante frisar que essa classificação só deva ser utilizada para os casos que ela foi desenvolvida e não como resposta para todo e qualquer problema em rocha.

O sistema RMR consiste na utilização de cinco parâmetros principais para classificar o maciço rochoso definidos como:

1. Resistência à compressão da rocha
2. RQD
3. Espaçamento entre descontinuidades
4. Condição das descontinuidades (abertura, preenchimento, persistência, rugosidade e alteração)
5. Presença de água no maciço rochoso

Considerando que o maciço não é uma estrutura homogênea, o RMR deve ser aplicado dividindo a área estudada em unidades uniformes que contenham características estruturais e geológicas semelhantes. Cada um dos parâmetros listados anteriormente conferirá a classificação determinado peso, os quais somados irão determinar a qualidade da estrutura avaliada (Tabela 5). A avaliação desses parâmetros poderá ainda ser penalizada devido a influência da orientação das descontinuidades e do tipo de projeto que se deseja executar, como galeria, fundações ou talude (Tabela 5 Parte B). Já as partes C e D da tabela fornecem a classificação e parâmetros esperados para o enquadramento obtido.

Tabela 5: Parâmetros quantitativos do RMR.

A. Parâmetros de classificação e seus índices									
Parâmetro			Valores						
1	Resistência da rocha	Índice de carga pontual (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Valores baixos, recomendado compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Índice		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Índice		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento médio (m)		>2	0,6-2	0,2-0,6	0,06-0,2	<0,06		
	Índice		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades		Superfície muito rugosa, não contínua, sem separação e sem intemperismo	Superfície levemente rugosa, separação <1 mm, levemente intemperizada	Superfície levemente rugosa, separação <1 mm, forte intemperismo	Superfícies planas ou preenchimento <5 mm ou abertura entre 1-5 mm contínua	Preenchimento >5 mm ou abertura >5 mm contínua		
	Índice		30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Fluxo de água por 10 m de galeria (l/min)	Sem ocorrência de água	<10	10-25	25-125	>125		
		Razão pressão da água na junta pela tensão principal	0	<0,1	<0,1	0,1-0,2	>0,5		
	Condições gerais		Seco	Pingos	Molhado	Gotejamento	Fluxo contínuo		
	Índice		15	10	7	4	0		
B. Ajustes para orientação das descontinuidades em relação a escavação									
Direção e mergulho das descontinuidades			Muito favorável	Favorável	Fraco	Desfavorável	Muito desfavorável		
Índices	Galerias		0	-2	-5	-10	-12		
	Fundações		0	-2	-7	-15	-25		
	Taludes		0	-5	-25	-50	-60		
C. Classificação geomecânica									
Score			100-80	80-61	60-41	40-21	<20		
Classe			I	II	III	IV	V		
Descrição do maciço			Muito bom	Bom	Fraco	Pobre	Muito pobre		
D. Significado da Classificação geomecânica									
Classificação			I	II	III	IV	V		
Tempo de auto sustentação/vão (m)			20 anos p/ 15 m	1 ano p/ 10 m	1 semana p/ 5 m	10 horas p/ 2,5 m	30 min p/ 1 m		
Coesão (kPa)			>400	300-400	200-300	100-200	<100		
Ângulo de atrito (°)			>45	35-45	25-35	15-25	<15		

Fonte: Bieniawski, 1989.

Para computar o valor de condições das descontinuidades, Bieniawski (1989) elaborou a Tabela 6 para que se pudesse computar de maneira quantitativa as condições das descontinuidades. Nessa tabela há diretrizes para a classificação do comprimento das descontinuidades, abertura, rugosidade, preenchimento e intemperismo. A soma dos valores obtidos para todos esses parâmetros irá compor o quarto item da Tabela 5.

Tabela 6: Diretrizes para a classificação da condição das descontinuidades.

Parâmetros	Intervalos de classificação				
Comprimento da descontinuidade	< 1	1 – 3	3 – 10	10 – 20	> 20
Valor	6	4	2	1	0
Separação / abertura (mm)	Sem abertura	< 0,1	0,1 – 1,0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm
Valor	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Pouco rugosa	Lisa	Estriada
Valor	6	5	3	1	0
Preenchimento (mm)	Sem preenchimento	Preenchimento duro		Preenchimento mole	
		< 5mm	> 5mm	< 5mm	> 5mm
Valor	6	4	2	2	0
Intemperismo	Não-alterada	Pouco alterada	Moderadamente alterada	Muito alterada	Decomposta
Valor	6	5	3	1	0

Fonte: Bieniawski, 1989.

A Tabela 7 serve como um guia para penalizar ou não a classificação de acordo com as orientações das descontinuidades e da escavação, para o caso de escavações subterrâneas. O valor da penalização pode ser consultado na Tabela 5.

Tabela 7: Ajuste para a relação entre o mergulho das descontinuidades e a orientação da abertura.

Direção perpendicular ao eixo do túnel		Direção paralela ao eixo do túnel	
Mergulho na mesma direção do avanço			
Mergulho entre 45-90°	Mergulho entre 20-45°	Mergulho entre 45-90°	Mergulho entre 20-45°
Muito favorável	Favorável	Muito desfavorável	Moderado
Mergulho contra a direção do avanço		Independente do mergulho	
Mergulho entre 45-90°	Mergulho entre 20-45°	Mergulho entre 0-20°	
Moderado	Desfavorável	Moderado	

Fonte: Bieniawski, 1989.

Para aplicações na mineração Lauscher (1977) e Kendorski et al (1983) propuseram alguns fatores que podem privilegiar ou penalizar o valor final da classificação de acordo com a equação abaixo:

Onde:

A_b = Ajuste pelo dano do desmonte (0,8 – 1)

A_s = Tensão *in situ* e variação de tensão (0,6 – 1,2)

S = Falhas principais e problemas estruturais (0,7 – 1)

Apesar da versatilidade do método, ele não é satisfatório para rochas fracas (Hoek et al., 2002). O que mais tarde foi estudado e proposto um novo método por Hoek et al. (1995) através do sistema GSI que se fundamenta mais na observação geológica e menos nos parâmetros numéricos.

2.3 PERFILAGEM GEOFÍSICA DO FURO DE SONDA

A perfilagem geofísica consiste na obtenção das informações da sequência litológica cortada por um furo na sondagem. Esse método, através do uso das sondas, mede propriedades físicas da parede do poço, trazendo leituras que são características das rochas ou de suas propriedades, tendo inúmeras aplicações. Essa prática teve início na década de 20, aplicação na indústria do petróleo. A técnica evoluiu bastante, sendo uma ótima ferramenta de amostragem para se conhecer diversas propriedades sem a necessidade de se ter os testemunhos de sondagem. Atualmente ela tem sido empregada nas mais diversas áreas, sendo as principais em atividades exploratórias de hidrocarbonetos, minerais metálicos, e aplicações ambientais (KEAREY *et al.*, 2009).

Ao longo das últimas décadas esta prática torna-se essencial para o conhecimento dos estratos em subsolo, conferindo agilidade e economia nas informações coletadas. Dentre as propriedades medidas, a perfilagem tem tido aplicação na determinação de espessura de estratos, mergulho das camadas, porosidade, saturação de fluidos, permeabilidade, densidade (massa específica), propriedades mecânicas das rochas, movimentação e características físico-químicas das águas subterrâneas, imagens, caracterização das fraturas e porosidade secundária, verificação de aspectos construtivos dos poços, entre outras aplicações.

Além de ser uma prática mais econômica em relação a sondagem rotativa, ela apresenta outras vantagens, como extrair informações *in situ* das zonas com baixa recuperação. Utiliza-se pouca instrumentação e o processo dos registros eletrônicos dos dados ocorre de maneira simplificada. Além disso, em algumas sondas fornece também a orientação do furo, assim como as fraturas e falhas. As sondas geralmente são utilizadas em combinação para se evitar resultados ambíguos (KEAREY et al, 2009). Abaixo está apresentada a relação das principais sondas com enfoque em classificação geomecânica e que serão detalhadas nesta dissertação:

- Perfil Sônico;
- Perfil de televisionamento óptico;
- Perfil acústico.

2.3.1 Equipamentos utilizados

Para a realização da perfilagem, os equipamentos utilizados podem ser de porte pequeno ou maior acoplado a um veículo ou estrutura, dependendo da dimensão do trabalho a ser realizado. O equipamento principal que faz a medição é a sonda ou *probe* que consiste em uma haste metálica, contendo dispositivos que vão medir parâmetros físicos das rochas. Esses perfis são baixados no furo com o auxílio de um guincho, com o qual é feito a descida do equipamento em uma velocidade controlada.

As informações são comunicadas através de um cabo elétrico que liga a sonda a unidade de aquisição, que por sua vez registra em um gráfico analógico e também em fita magnética analógica ou digital para o processamento por computador. Além de fazer a comunicação, ele também fornece energia para sonda.

A unidade de perfilagem é composta pelos seguintes equipamentos, que podem ser vistos no esquema da Figura 11:

- veículo para transporte
- guincho
- unidade de aquisição de dados
- computador (notebook)
- cabo elétrico

- sondas de perfilagem

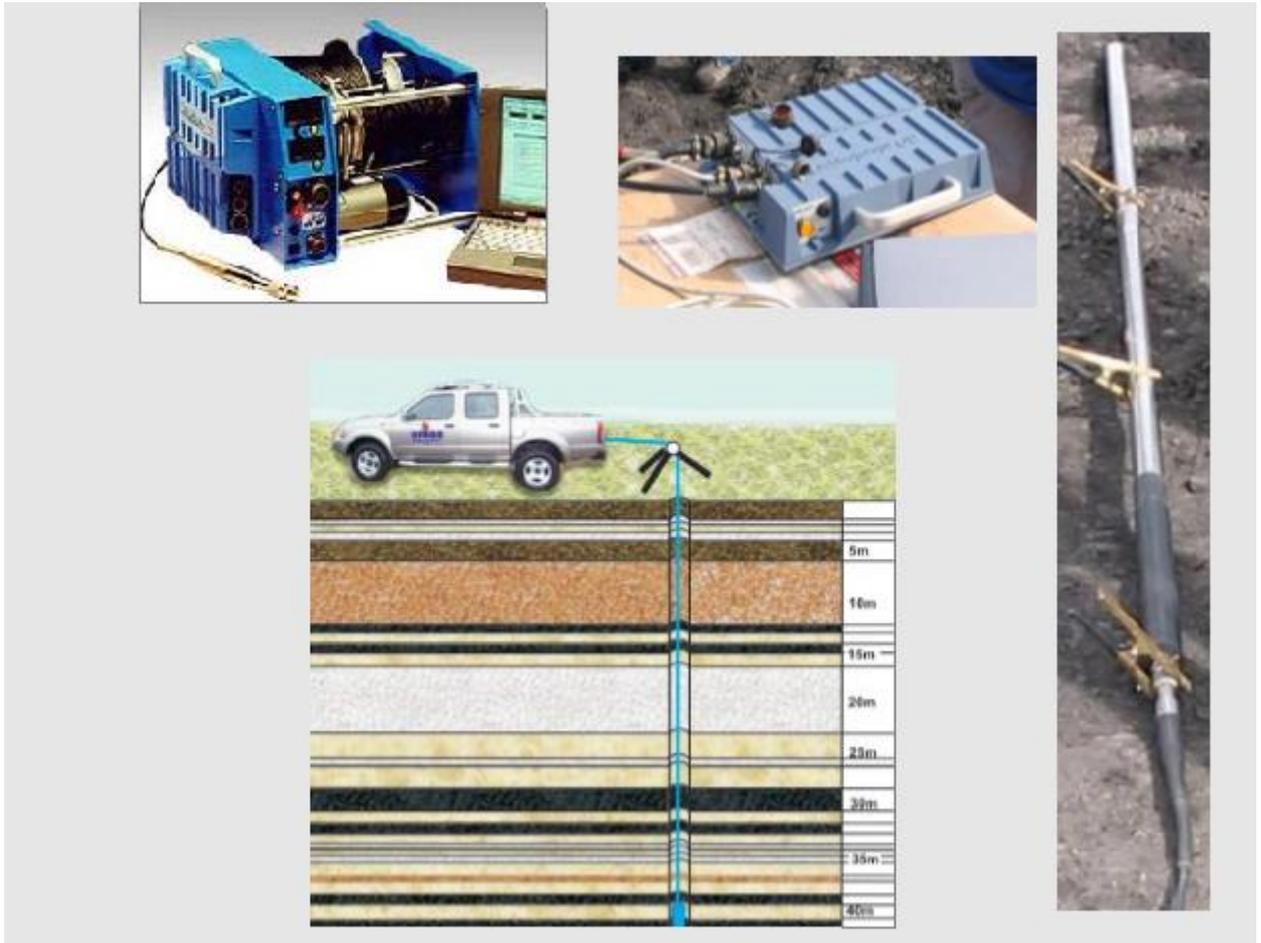


Figura 11: a) Guincho e notebook para o armazenamento de dados. b) Unidade de aquisição de dados. c) Veículo de transporte e detalhe do da aquisição de dados d) Sonda de perfilagem com cabo elétrico acoplado.

Fonte: Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro – UFRGS, 2018.

Antes de iniciar a coleta de dados é importante que a sonda esteja referenciada corretamente quanto a cota do terreno. Essa referenciação é chamada de zeragem do equipamento, onde a parte superior é alinhada com a boca do furo e esta posição é definida como zero metros de profundidade.

2.3.2 Ambiente do furo

O ambiente do furo pode se encontrar de várias maneiras, o que pode influenciar na medição. Os furos podem se encontrar intactos, ou seja, com o formato da broca de perfuração, ou com irregularidades devido à baixa competência da rocha ou convicções

ambientais como o *mudcake*. Essa situação pode influenciar na centralização do furo ou na resolução da medida. Para saber qual a situação do furo, é utilizado a sonda cáliper.

Os furos também podem estar preenchidos ou não com líquido, que normalmente é água subterrânea. Esse fator é necessário na operação de algumas sondas como a sônica, acústica e a elétrica, que só conseguem atuar em meio líquido. Enquanto que o OPTV é necessário somente que a água seja limpa sem suspensão de sólidos.

Furos revestidos geralmente influenciam nas medidas também por serem o primeiro contato com a sonda, o que impossibilita a medida do sônico e do perfil de resistividade. Sendo assim, os furos em geral devem ser preenchidos por líquido e não revestidos.

2.3.3 Resolução vertical e profundidade de investigação

Resolução vertical é a medida da espessura mínima em que a sonda consegue gerar uma medida. Já a profundidade de investigação é a profundidade máxima interior da rocha que ocorre a varredura da informação para a geração de um dado.

Sondas com boa resolução vertical conseguem gerar dados na casa dos milímetros. Regiões que apresentam camadas finas requerem sondas assim, pois outras, de resolução menor, forneceram dados da média das camadas. No que diz respeito a profundidade de investigação, sondas como a de resistividade são capazes de fornecer informação que vão além da parede do furo, captando a rocha *in situ*.

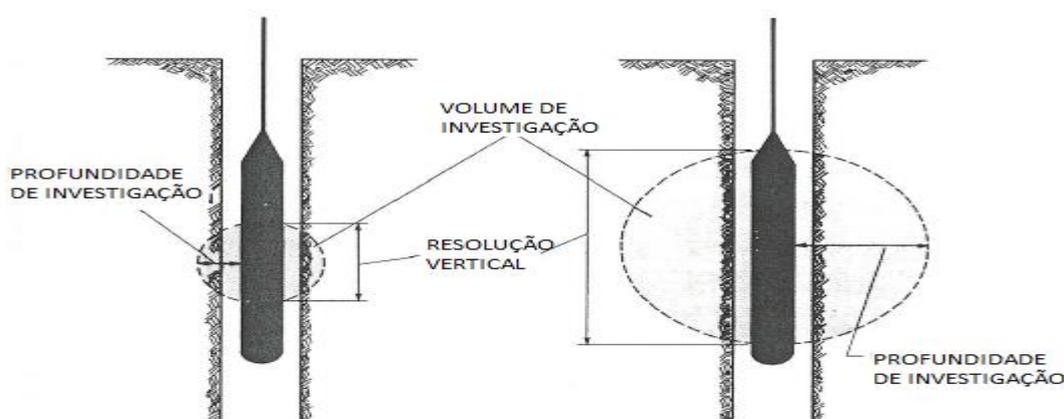


Figura 12: Resolução vertical e profundidade de investigação para uma sonda com volume de investigação esférico.

2.3.4 Perfil sônico

A perfilagem sônica busca medir a velocidade de ondas mecânicas sônicas e ultrassônicas que percorrem parede do furo de sondagem. A sonda emite pulsos com energia que percorrem o fluido do furo e a parede sendo detectados por dois ou mais receptores na outra extremidade da sonda (Figura 13) A diferença nos tempos de chegada do trem de ondas sônicas entre dois receptores é utilizada para se determinar a velocidade da onda na rocha. Geralmente essa medida é feita na unidade de medida pé/s.

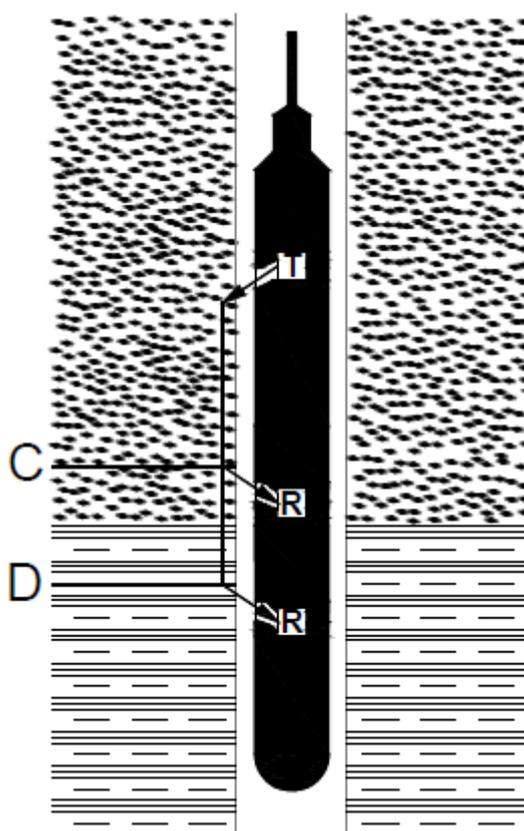


Figura 13: Sonda sônica com um transmissor e dois receptores mostrando o caminho da onda sônica. A diferença entre o tempo de trânsito é medida pela diferença entre a chegada da onda nos receptores, correspondendo ao tempo de trânsito no estrado CD.

Fonte: Oyler *et al.*, 2007.

2.3.4.1 Tipos de onda

As principais ondas que são detectadas nesse processo são as ondas compressoriais (ondas P) e as ondas de cisalhamento (ondas S). A primeira é a mais rápida apresentando a

deformação, compressão e expansão, no mesmo sentido da propagação, sendo a única que ocorre no fluido (Figura 14). Já as ondas de cisalhamento, são mais lentas, cerca de 1,6 a 2 vezes que as ondas P, apresentando a sua deformação numa direção perpendicular à direção de propagação (SERRA, 2008) (Figura 15).

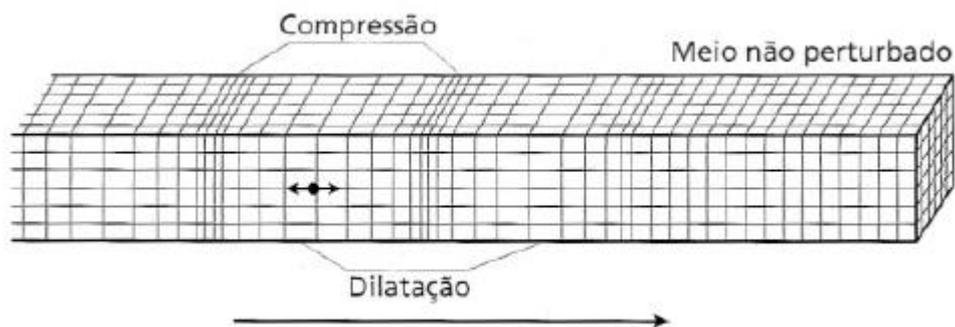


Figura 14: Deformações elásticas e movimentos de partículas do terreno associados a passagem de ondas compressionais.

Fonte: Serra, 2008.

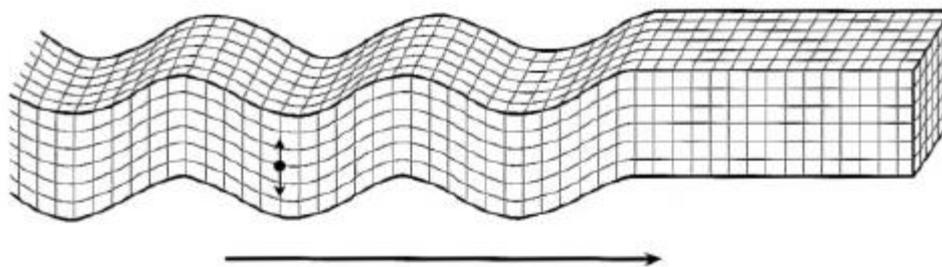


Figura 15: Deformações elásticas e movimentos de partículas do terreno associados a passagem de ondas cisalhantes.

Fonte: Serra, 2008.

2.3.4.2 Relações matemáticas

A passagem de ondas pela rocha ocorre devido características inerentes ao material, tal como seus módulos elásticos e densidade, os quais influenciam diretamente na propagação das ondas. Sendo assim tal relação pode ser vista a seguir na determinação de velocidade de onda P (Equação 3) e velocidade de onda S (Equação 4).

$$v_p = \left[\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho} \right]^{1/2} \quad \text{Equação 3}$$

$$v_s = \left[\frac{\mu}{\rho} \right]^{1/2} \quad \text{Equação 4}$$

v_p = Velocidade de onda P

v_s = Velocidade de onda S

K = módulo volumétrico

μ = módulo de rigidez

ρ = densidade

Com as fórmulas é possível também determinar a razão de Poisson, a qual está relacionada a razão entre as velocidades:

$$v_p/v_s = \left[\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)} \right]^{1/2} \quad \text{Equação 5}$$

v_p = Velocidade de onda P

v_s = Velocidade de onda S

ν = coeficiente de Poisson

É importante notar que essa última relação fornece um resultado direto do coeficiente de Poisson, ao contrário das outras relações que dependiam de mais variáveis separadas, podendo gerar resultados ambíguos.

Essas relações fundamentais entre a velocidade de propagação da onda e as propriedades físicas dos materiais através dos quais as ondas passam são independentes da frequência das ondas. A velocidade com que a onda se propaga só dependerá do tipo de onda e das propriedades elásticas e densidade do material (KEAREY et al., 2002).

Esse método permite conhecer a velocidade desses dois tipos de ondas nos estratos rochosos, e com esses resultados inferir diversas características das rochas do furo.

2.3.4.3 Fatores que influenciam a velocidade nas rochas

As rochas são materiais que apresentam heterogeneidade pois são constituídas por diversos minerais, podendo apresentar poros e fraturas, além de fluidos ou materiais que

ocupam estas cavidades. Visto que a velocidade depende exclusivamente do módulo elástico e densidade dos materiais, uma rocha apresentará diferentes velocidades de acordo com cada material que é percorrido pela onda sônica. Sendo assim, a velocidade é influenciada por todos essas características dos materiais e espaços compreendidos em um corpo rochoso, sendo uma média ponderada por todas essas características.

Uma rocha mais densa, por exemplo, apresentará uma alta velocidade, por outro lado, caso a mesma rocha esteja fraturada, sua velocidade será a ponderação do tempo que a onda leva para passar na parte cristalina e pelos espaços vazios.

2.3.5 Perfil Optical Televiewer

A sonda optical televiewer (OPTV) capta uma imagem do furo em 360° de forma contínua e orientada através de uma câmera. A câmera capta imagens da parede do furo refletidas por um espelho cônico. No segmento inferior da sonda, suas paredes são transparentes e contém lâmpadas e um espelho cônico (Figura 16). Na parte superior está localizada a câmera e um sistema de orientação magnética, além de um dispositivo que transmite as informações da câmera para o computador na superfície (BAILLOT *et al*, 2002).

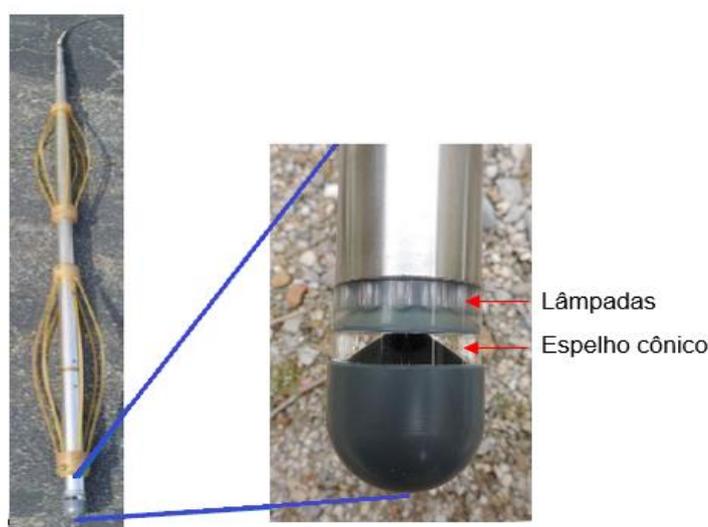


Figura 16: Sonda de *Optical Televiewer*.

Fonte: adaptado de Richter *et al*, 2016.

Independentemente do tipo de perfuração empregada ou da qualidade do maciço, o OPTV sempre atinge uma recuperação virtual de 100%. O método geralmente fornece

imagens da parede do furo com alta definição, e colorida, as quais podem ser mostradas tanto abertas, representando a varredura de 0-360°, ou fechadas, simulando um testemunho de sondagem (Figura 17), sendo de grande importância na identificação das zonas do maciço rochoso assim com suas descontinuidades, presença de preenchimento, alteração e até mesmo é possível detectar fluxo de água subterrânea na filmagem.

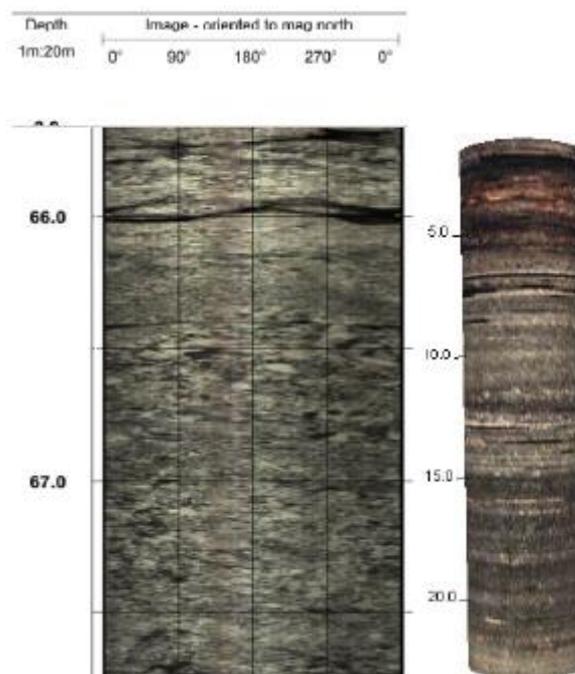


Figura 17: a) Exemplo de resultado de imagem obtida por sondagem de *Optical Televiewer*; b) Reconstrução de testemunho virtual a partir de imagens de parede do furo.

Fonte: Richter *et al.*, 2016.

O método é bastante utilizado para melhorar a produtividade da investigação do maciço rochoso, pois complementa a sondagem testemunhada, reduz tempo e custos. De acordo com Baillot *et al.* (2002 p.2);

“A combinação de perfuração percursiva e televisionamento de furos cobre de 6 a 10 vezes mais metros lineares de furos por tempo do que sondagem testemunhada com broca diamantada”.

2.3.5.1 Condições de operação

Esta sonda opera bem em furos variando de 75 milímetros a 300 milímetros, preenchidas por ar, ou se estiverem com fluido, este deve estar cristalino para que seja possível uma boa coleta das imagens. A qualidade da imagem varia de acordo com o equipamento utilizado e também com o tipo de perfuração realizada. Furos feitos com broca diamantada costumam produzir excelentes resultados, já os feitos com broca destrutiva apresentam resultados inferiores, porém aceitáveis. Além disso, devido a substancial quantidade de dados gravados, o resultado é sensível a velocidade da sonda, sendo assim, uma boa leitura se dá com um avanço em torno de 1,0 metro/minuto.

2.3.6 Perfil Acoustic Televiwer

Por meio da emissão e detecção de ondas acústicas, esse método gera uma imagem 360° do furo, mapeando suas descontinuidades de forma orientada. Essa sonda tem como princípio a emissão de ondas ultrassônicas, que viajam através do fluido presente no furo até se chocarem com a parede e retornarem por reflexão. No retorno das ondas, sua amplitude e tempo de trânsito são detectados e gravados, podendo-se gerar uma imagem das paredes do furo e o seu formato, conforme Figura 18.

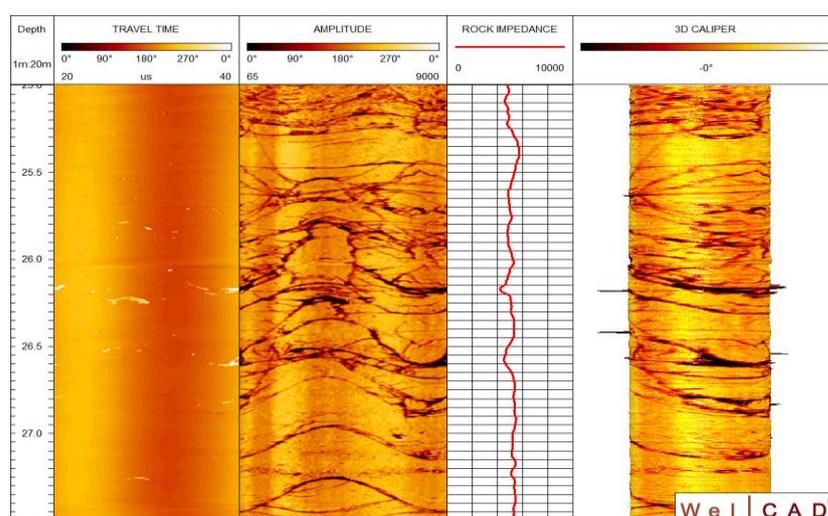


Figura 18: Conjunto de imagens obtido pelo perfil acústico: tempo de trânsito, amplitude, impedância acústica e imagem do tempo de trânsito e amplitude

Fonte: Corstanje *et al.*, 2009.

Na Figura 18 é mostrado, na primeira coluna, a imagem do tempo de trânsito da onda, seguido pela amplitude da reflexão, na terceira coluna é mostrada a impedância média de cada seção do furo, e na última coluna é construída uma imagem 3D do furo.

As variações ou atenuações na amplitude das ondas são indicativos de pontos com descontinuidade e também mudança de impedância que há entre diferentes rochas, já o tempo de trânsito das ondas varia conforme o raio do furo (Corstanje *et al.*, 2009).

O tempo de trânsito é um dado obtido pelo tempo que a onda levou para percorrer de sua saída do centro da sonda, reflexão na parede do furo, até seu retorno e detecção. Com essa informação é possível montar calcular a que distância se encontra a parede do furo da sonda e montar seu perfil tridimensional. É interessante perceber que essa detecção do formato do furo, pelo cálculo do tempo de onda, funciona como um calíper de múltiplos braços

A amplitude da onda consiste na intensidade da energia que retorna após a reflexão na parede do furo. Tal dado é plotado com diferentes tonalidades, as quais ajudam a identificar variações nas rochas, principalmente na identificação de descontinuidades.

A impedância da rocha é proporcional a amplitude. Dessa forma o comportamento da amplitude descreve de forma precisa as variações de impedância. Porém, para o cálculo correto do valor verdadeiro da impedância, deve-se fazer o produto da densidade pela velocidade de onda ultrassônica da rocha, as quais podem ser obtidas com perfis específicos (Corstanje *et al.*, 2009).

2.3.6.1 Condições de operação

O método opera bem em furos de 75mm a 300mm. Para transmissão das ondas, o furo deve ser preenchido por fluido, porém ele não precisa ser cristalino, podendo operar em meio a água turva. Como o método utiliza como princípio ondas mecânicas, ele é uma ótima ferramenta para se gerar imagens em líquidos sem visibilidade e também detectar fraturas que em um método óptico passariam despercebidas. Assim como o OPTV, furos feitos com broca diamantada costumam produzir excelentes resultados, enquanto os feitos com broca destrutiva apresentam resultados inferiores, mas aceitáveis.

2.3.6.2 Detecção de descontinuidades

As descontinuidades são identificadas por pontos onde há atenuação da onda refletida. Ao se encontrar com uma fratura, a onda sofre uma dispersão, o que atenua amplitude do trem de ondas que retorna. Como resultado, é possível identificar planos de acamamento, fraturas, juntas, falhas e até mesmo tamanho de grãos (SCHEPERS, 2004). Além disso, a perfilagem acústica é orientada, então com isso é possível identificar o ângulo de mergulho, assim como a orientação das fraturas a partir da imagem obtida.

2.3.6.3 Relação com propriedades elásticas

A variação de amplitude pode ser também relacionada com as propriedades elásticas do material. O impulso refletido das ondas apresenta amplitudes diretamente relacionadas com as características das rochas que está sob teste. Sendo assim, rochas mais duras e mais competentes refletem ondas com amplitude maior, indicando altos índices elásticos.

2.3.6.4 Relação com tensão do maciço

A identificação do formato do furo pelo tempo de trânsito das ondas pode ainda fornecer informações sobre o estado de tensão do maciço. Segundo Barton *et al.*, (1998) isso pode ser observado com a deformação o furo para um estado mais elíptico, a deformação indica que o lado mais abaulado corresponde a uma tensão geológica maior que o lado mais agudo (Figura 19).

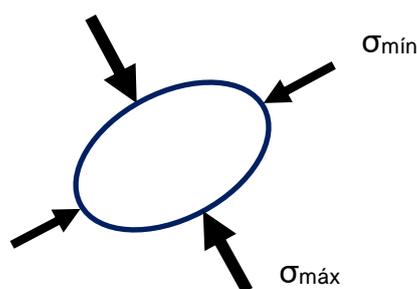


Figura 19: Deformação do furo devido a tensões do maciço rochoso.

Fonte: Barton *et al.*, 1998.

2.4 PERFILAGEM NA MEDIDA E ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS GEOMECÂNICOS

A perfilagem, com sua diversidade de sondas, é capaz de gerar dados do maciço rochoso que podem ser convertidos em parâmetros geomecânicos ou correlacionados com eles. Os parâmetros que usualmente são obtidos visualmente, como as descontinuidades e suas características, podem ser obtidos de forma análogas por perfis como o acústico ou o *optical televiewer*. Já propriedades de resistência à compressão, que normalmente são obtidas em ensaios laboratoriais, podem ser obtidas com confiabilidade com dados de porosidade, velocidade de onda sônica da rocha, entre outros, a partir de informações das diversas sondas que são utilizadas.

Além de se mostrar como um método versátil na aquisição dos principais parâmetros geomecânicos, a perfilagem tem como vantagem a rápida coleta dos dados, e se mostra interessante por trazer informações do interior do maciço rochoso ainda não perturbado pela mineração ou projeto civil. Como a sonda é uma ferramenta que percorre todo o furo, os dados coletados são importantes por apresentarem propriedades da rocha praticamente *in situ*, perturbada somente com a execução do furo. Dessa forma, a perfilagem é uma ferramenta promissora na aquisição dos parâmetros geomecânicos, podendo complementar os métodos tradicionais, dando mais agilidade na classificação geomecânica.

2.4.1 Estimativa de resistência à compressão por meio de perfilagem geofísica

A resistência à compressão da rocha é um dos parâmetros mais difíceis de se estimar utilizando propriedades geofísicas. Isso ocorre devido ao fato de que as propriedades medidas na perfilagem não apresentam regressão direta com a resistência à compressão. Apesar disso, inúmeros pesquisadores já conseguiram definir regressões empíricas que produzem resultados satisfatórios envolvendo diversas propriedades conforme a tabela abaixo.

Tabela 8: Pesquisa desenvolvido por diversos autores para a estimativa da resistência à compressão.

Propriedade	Autor
Velocidade sônica (V_p)	Militzer (1973); McNally (1987); Oyler et al., (2007); Sharma and Singh (2008); Butel (2014) e Rao et al., (2015).
Porosidade	Vernik et al., (1993) e Edlmann et al., (1998)
Módulo elásticos (E, M, G, K) e densidade	Inoue e Ohomi (1981); Moos et al., (1999) e Lima et al., (2016)
Impedância acústica	Frederick <i>et al</i> (2014)
Propriedades combinadas	Sharma <i>et al.</i> , (2010) e Ersoy & Kanik, (2012)

Fonte: Autoria Própria, 2018.

2.4.1.1 Velocidade sônica

Uma das propriedades mais estudadas para a determinação de resistência à compressão da rocha na mineração é a velocidade sônica/ultrassônica. Embora seja uma regressão considerada empírica, diversos autores têm encontrado equações confiáveis para seus ambientes geológicos, ou seja, com coeficiente de regressão superior a 70% dos dados correlacionados o qual é aceitável do para esse tipo de estimativa (OYLER *et al.*, 2008a). A Figura 20 mostra um exemplo de regressão entre a velocidade da onda primária (V_p) com a resistência à compressão da rocha (UCS).

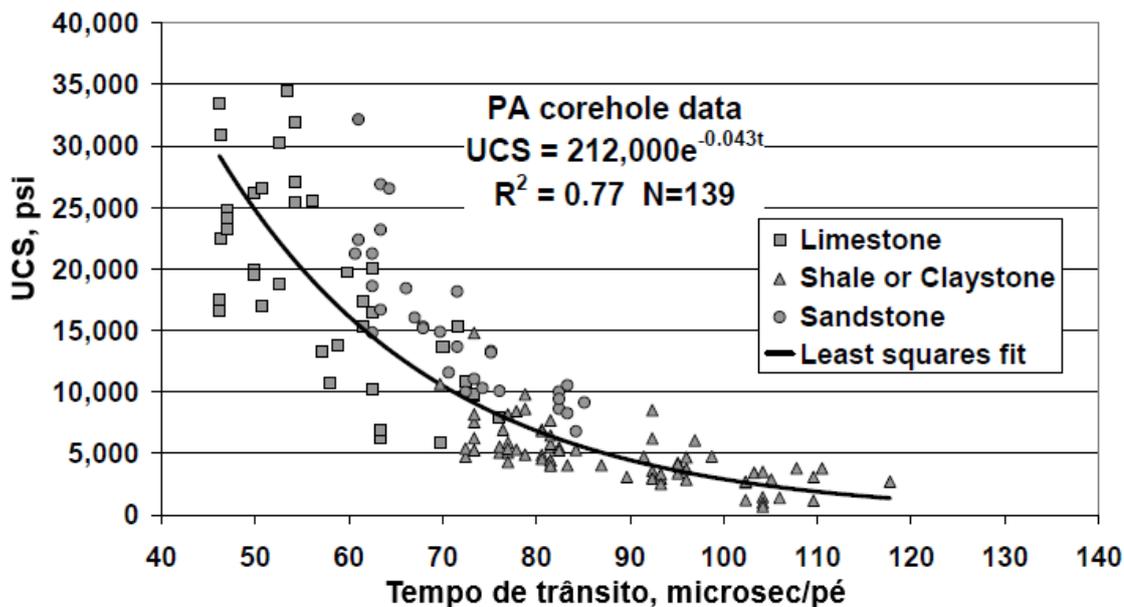


Figura 20: Curva de regressão entre resistência a compressão uniaxial e tempo de transito de onda.

Fonte: Oyler *et al.*, 2008b.

Rao *et al* (2015) ainda ressalta como correlações como essa tem sido importante para design de minas de carvão australianas, pois através dessa informação é possível plotar perfis de resistência de rocha (Figura 21), assim como estimar a resistência à compressão em qualquer furo destrutivo.

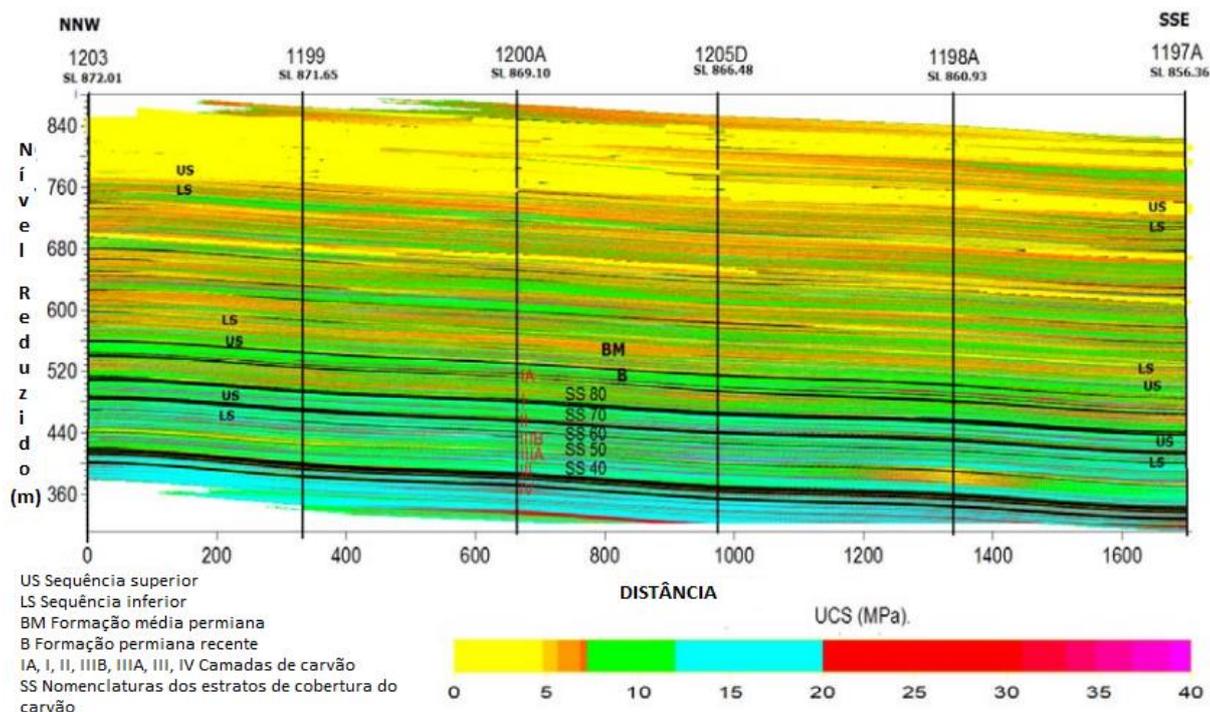


Figura 21: Perfil de resistência de rocha gerado a partir de dados de velocidade de onda sônica

Fonte: Rao *et al.*, 2015.

Como as curvas de regressão apresentam uma dispersão nos resultados, há tentativas de se delimitar as causas de erro e a retirada dos dados anômalos com base em algum critério e controle de qualidade das informações recuperadas.

Nesse contexto, muitos autores têm desenvolvidos correlações para suas regiões e também para litologias específicas com o objetivo de melhorar a resposta obtida. Segundo Butel (2014) não há consenso entre os autores se cada localidade geológica necessita da sua própria correlação, ou se poderia ser feita por litologia. Sendo essas as duas vertentes de pensamento. A conclusão que Butel (2014) chegou é que tanto as rochas de uma localidade para a outra variam, assim como a mesma litologia de um lugar para outro, sendo assim, deve-se usar as equações com cuidado.

Apesar disso, comparando com os demorados e onerosos ensaios de laboratório, essas estimativas são ótimas ferramentas para se obter um conhecimento geotécnico do maciço rochoso com mais agilidade.

2.4.1.2 Módulos elásticos e densidade

Outra maneira de se estimar a competência da rocha é pelas medidas dos módulos de Young (E), módulo de cisalhamento (G), módulo compressional (M), volumétrico (K) e coeficiente de Poisson através dos dados fornecidos pela sonda sônica, e suas relações matemáticas, vistos no item 2.3.4.2.

Lima *et al.*, (2016) realizou medições em diversos tipos de rocha fazendo regressão entre os módulos elásticos e a resistência à compressão. Também foram feitas regressões entre a densidade, porosidade e velocidade com a resistência à compressão da rocha conforme a figura abaixo. Os testes foram feitos em 30 amostras em escala laboratorial, resultando em regressões com coeficiente de determinação altos.

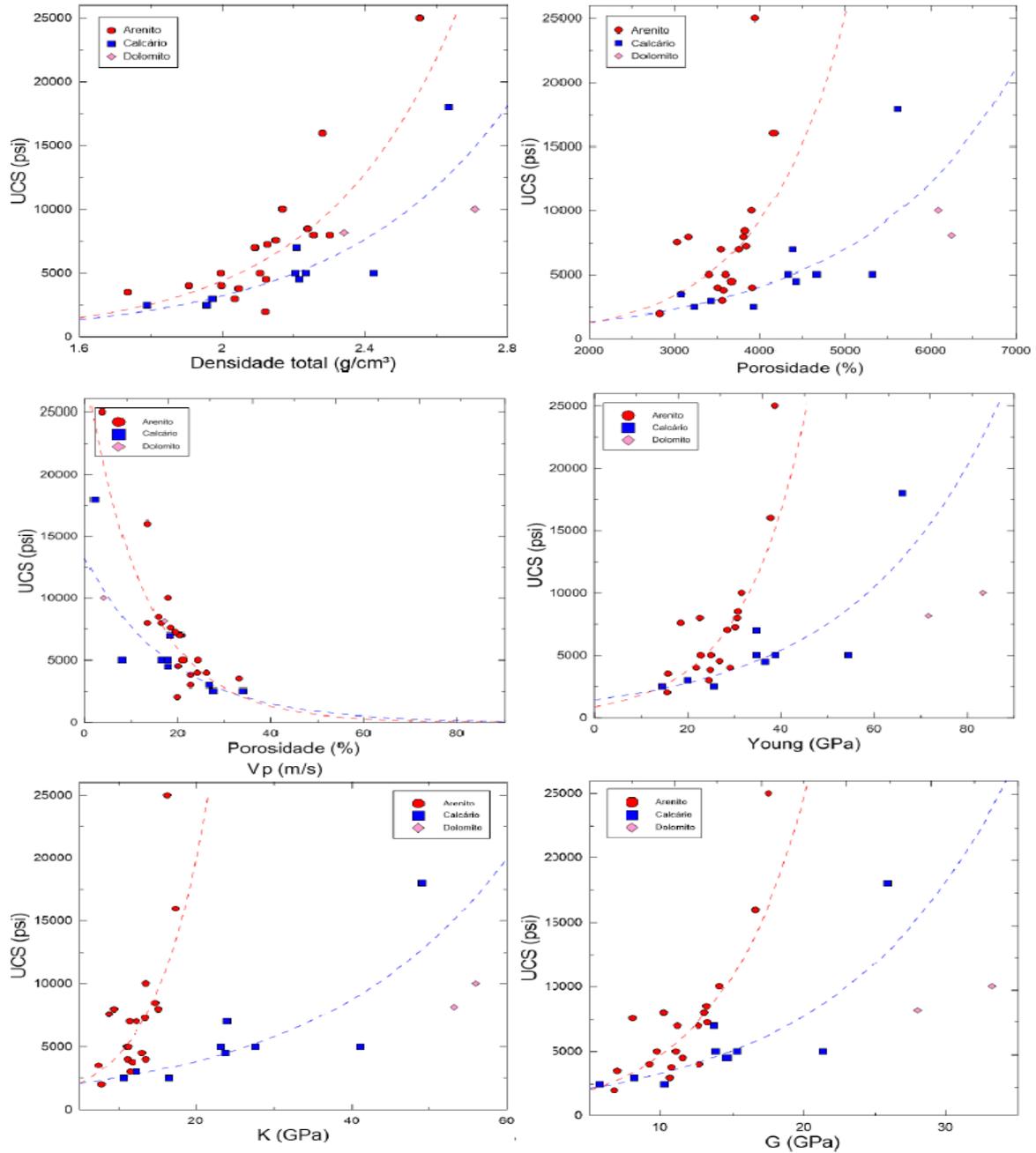


Figura 22: Curva de regressão entre a resistência à compressão e os módulos elásticos.

Fonte: Lima et al., 2016.

2.4.1.3 Propriedades combinadas

Embora todas as propriedades da rocha estejam ligadas à resistência à compressão e de forma direta ou indireta a influencie, nem sempre a variação de um fator vai mudar a resistência à compressão na mesma proporção, por isso avaliar suas propriedades em conjunto pode trazer mais segurança às estimativas (SHARMA *et al.*, 2010; ERSOY & KANIK, 2012).

Entre as propriedades mais correlacionadas com a resistência da rocha, as que ganham mais destaque são a velocidade e onda sônica e a porosidade (TUGRUL & ZARIF, 1999), por isso considerá-las juntas assim como adicionar outras pode melhorar as correlações obtidas.

Ersoy & Kanik, (2012), por exemplo, consideraram diversos fatores que influenciam a resistência à compressão da rocha como a velocidade de onda sônica, porosidade, densidade, umidade. Eles conseguiram estabelecer um coeficiente de correlação melhor ao testar diferentes valores para a influência de cada uma dessas propriedades, na qual a velocidade teve influência de 45% e a porosidade de 33%, os demais componentes contribuíram com menos de 10%.

2.4.2 Medidas dos parâmetros das descontinuidades

Dos métodos de perfilagem, os mais adequados para identificar descontinuidades e avaliar suas características são os das sondas acústicas e *optical televiewer*. Nas últimas décadas estas sondas têm sido cada vez mais utilizadas como fonte complementar de dados na identificação das estruturas, descontinuidades e suas orientações (FREDRICK *et al.*, 2014). Além disso, seu uso pode ser empregado tanto em furos testemunhados ou destrutivos.

2.4.2.1 Presença, mergulho e orientação das descontinuidades

Tanto o *optical televiewer* quanto a sonda de imagem acústica são eficientes para a identificação de descontinuidades. E como a perfilagem é orientada, é possível também identificar o ângulo de mergulho e o azimute de cada uma delas.

Assim como é feita a contagem das descontinuidades em um testemunho para o cálculo da frequência de fraturas e de RQD, também é realizado a partir das imagens obtidas pelas sondas. Nesse sentido, a perfilagem tem vantagem sobre o método tradicional por poder identificar quais são as zonas altamente fraturadas, o que acaba não sendo possível ser feito com precisão em testemunhos de sondagem (FREDRICK *et al.*, 2014). Por outro lado, ao analisar as imagens obtidas e comparar com os testemunhos de um mesmo local, nota-se que os testemunhos apresentam fraturas que não existiam no maciço, as quais são atribuídas ao

processo de sondagem, manipulação e transporte dos testemunhos (BAILLOT, *et al.*, 2002). Por esse motivo, deve-se atentar para a diferença dos resultados que se obtém ao classificar o maciço rochoso por testemunhos virtuais, pois estes sempre apresentam uma classificação superior à feita com base nos testemunhos de sondagem.

A consultoria SRK (2015) em um estudo de caso, mostrou como a contagem de descontinuidades pode variar do método tradicional para o método de televisionamento. A identificação de fraturas foi de 100-200% maior do que no método tradicional para a maioria dos furos analisados (Figura 23). Este dado é bastante relevante, pois o número de descontinuidades é a principal informação nos esquemas de classificação de maciço rochoso. No estudo de caso a classificação RMR foi de 6 a 9% maior na avaliação com o televisionamento acústico em comparação ao método tradicional, o que poderia levar a aumento de ângulo de talude ou outro parâmetro que impacte na segura.

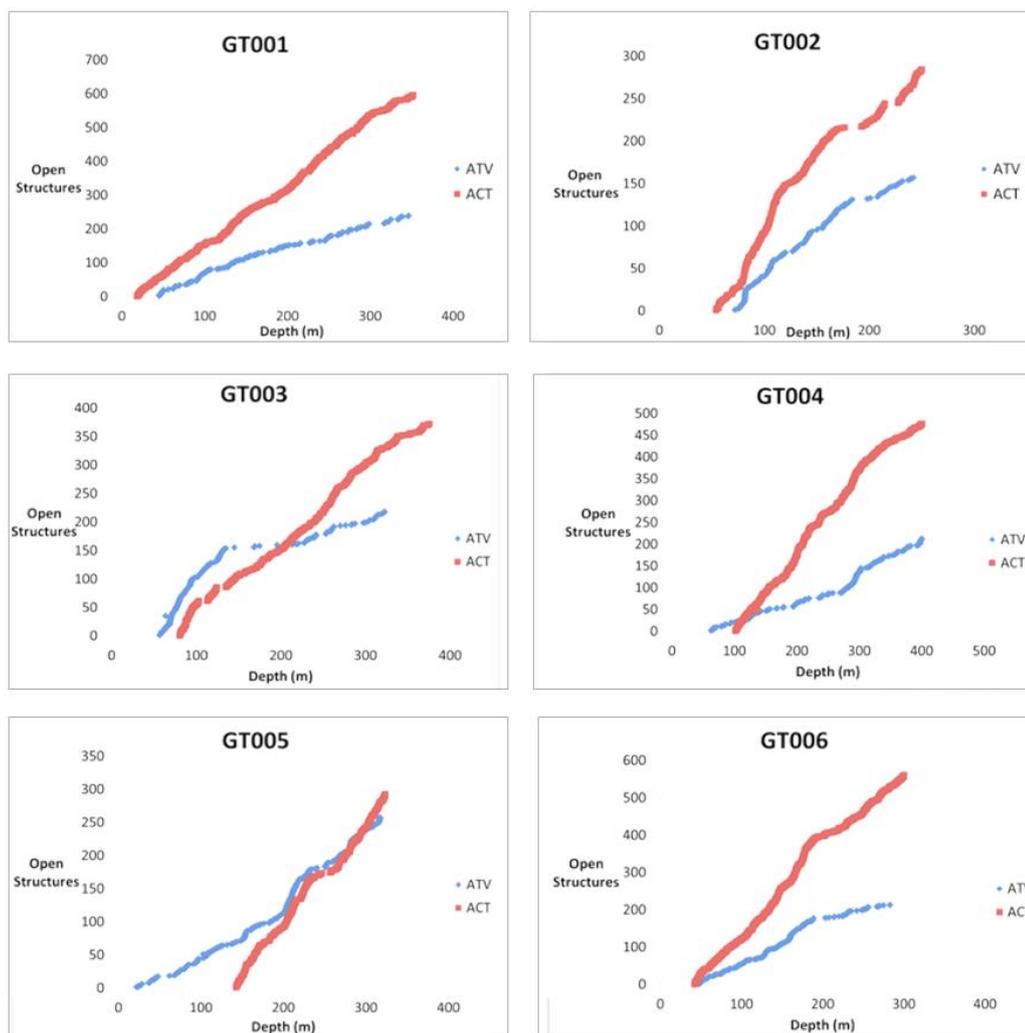


Figura 23: Registro do número de fraturas pela profundidade do furo pelo método tradicional (vermelho) e pelo método acústico (azul).

Fonte: SRK (2015)

Os métodos OPTV e ATV também fornecem informações de mergulho e orientação de cada estrutura, as quais podem ser utilizadas posteriormente para rigorosa análise da estabilidade dos taludes. A presença de mergulho pode ser verificada pela ocorrência de um desenho em forma de senóide na imagem gerada, ou diretamente no furo virtualmente recomposto. O ângulo e a direção são calculados por programas de interpretação baseados nas coordenadas lidas ao longo da descontinuidade, conforme Figura 24.

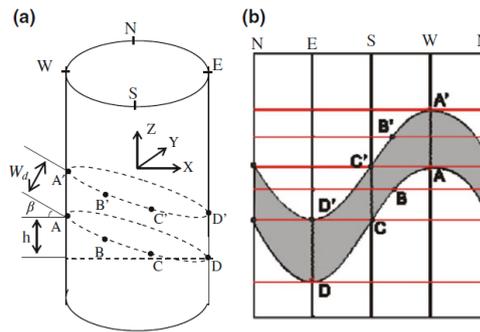


Figura 24: a) Furo virtualmente reconstituído mostrando medidas de mergulho, espessura e posição das coordenadas marcadas. b) Coordenadas consideradas para os cálculos.

Fonte: Li *et al.*, 2013.

2.4.2.2 Características das discontinuidades

Com o uso da sonda *optical televiewer* e acústica é possível identificar diversas estruturas a partir da imagem da parede da rocha. As discontinuidades podem ser vistas e classificadas quanto a sua abertura, preenchimento, tipos (patamar, ondular e planar), e graus (rugosa, lisa, espelhada). Ambas as sondas têm precisão em torno de 0,1 milímetros, podendo ser inferior, dependendo da velocidade de descida da sonda.

A rugosidade é interpretada cuidadosamente pelo que se vê na imagem. Porém, devido a limitação da resolução, não se consegue a mesma precisão que ocorre na avaliação de testemunhos de sondagem. Para uma melhor interpretação, deve-se considerar o padrão de rugosidade encontrado durante a calibração (FREDERICK *et al.*, 2014). Além da inspeção visual, é possível identificar a rugosidade de forma automatizada através de software. Para fazer essa análise, o software considera que uma fratura espelhada apresenta um traçado senoidal, dessa forma, quanto mais o formato da linha se afasta de uma senoide perfeita, mais rugosa é considerada a fratura (VALLEY & BAHRANI, 2009) (Figura 25).

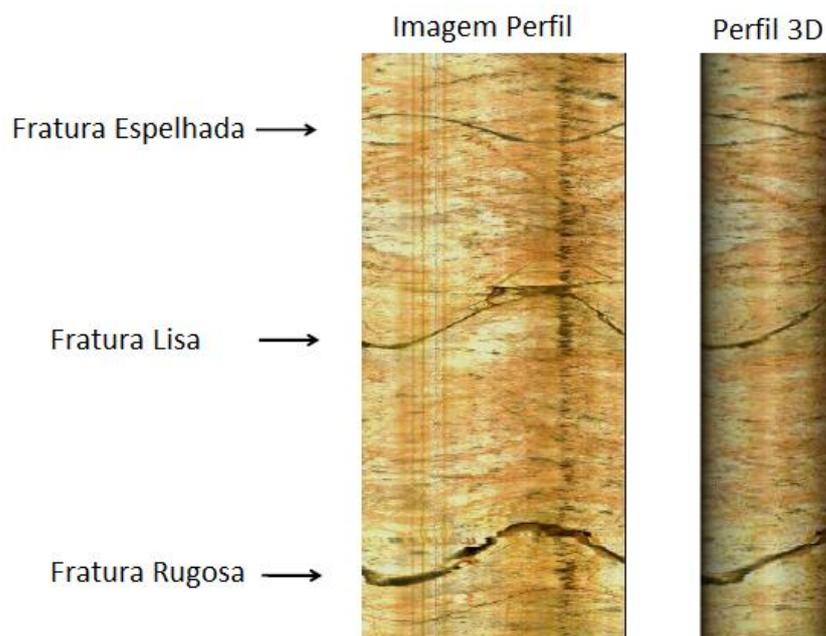


Figura 25: Exemplo da identificação de rugosidade da fratura. Na imagem é possível identificar a abertura da fratura, sendo maior na mais rugosa

Fonte: Valley & Bahrani, 2009.

Com relação a abertura e preenchimento das discontinuidades, essas são detectadas a partir da combinação das duas sondas ATV e OPTV. A abertura é detectada facilmente pelo ATV por meio da amplitude da onda refletida, sendo esta nula nos pontos de abertura. Já o preenchimento é detectado de forma mais precisa pela análise de ambas sondas combinadas, a sonda óptica permite uma inspeção visual do preenchimento, e a acústica contribui evidenciando a presença de enchimento a partir de diferentes valores da amplitude refletida.

2.4.3 Classificações geomecânicas baseado em perfilagem

Gwynn *et al* (2013) estudaram como a combinação de métodos de televisionamento com métodos de classificação de testemunho tradicional poderia ser utilizada na coleta de dados geotécnicos de forma prática. Os autores afirmam que dados de televisionamento seriam destinados a coletar informações de RQD e espaçamento entre fraturas, enquanto a análise dos testemunhos se restringiriam a identificação litológica, de resistência a compressão uniaxial e alteração. Outros parâmetros como rugosidade e preenchimento poderiam receber um valor médio pré-definidos para cada estrutura. Esse sistema híbrido foi aplicado num estudo de caso na Suécia para análise de estabilidade de talude. Conclui-se que o sistema trouxe vantagens no ganho de tempo na classificação de fraturas, redução de custo e

maior precisão na identificação de orientações, porém, foi chamado a atenção para possíveis dificuldades em manter a correção entre a profundidade das duas medidas.

Já segundo Fredrick *et al.* (2014), medições feitas com OPTV e ATV são suficientes para classificar o maciço de acordo com os principais sistemas de classificação. Porém, previamente é necessário validar os instrumentos realizando perfilagens e comparando com furos de sondagem. Sobre esse processo, Fredrick *et al.* (2014) afirma que “A quantidade de sondagem testemunhadas tradicionais necessárias para o processo de calibração depende do tamanho da área do projeto e da variabilidade litológica, mas tipicamente é da ordem de dois a quatro furos de sondagem ou de 200 a 500 metros perfilados.

2.4.3.1 Sistema Rock Mass Rating (RMR)

Fredrick *et al.* (2014) realizou medições feitas com televisionamento óptico e acústico buscando encontrar todos os parâmetros utilizados para a classificação segundo o sistema RMR. Utilizando dados de cinco minas foram analisados testemunhos e furos de sondagem pelo método tradicional e a partir de arquivos das perfilagens, resultando em duas classificações RMR.

Dos resultados, dois modelos de classificação do maciço foram construídos e comparados estatisticamente, resultando em um forte coeficiente de correlação com desvio padrão de 2% entre os resultados obtidos (Figura 26). Na figura está a seção de uma modelo 3D, mostrando a forte correlação pela comparação visual e estatística dos modelos.

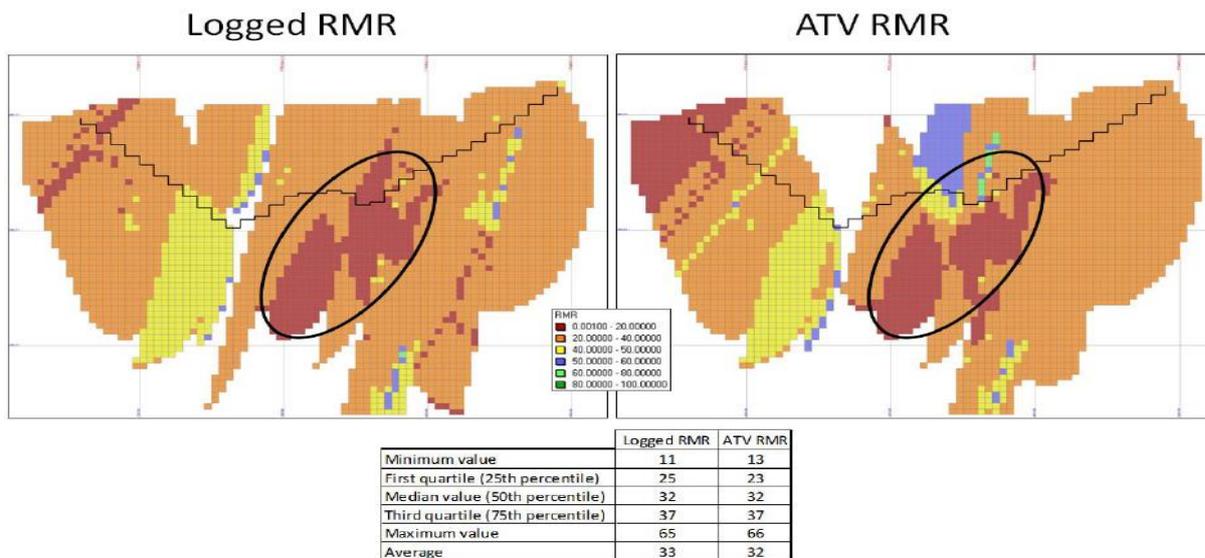


Figura 26: Seção do modelo de maciço classificado segundo o sistema RMR

Fonte: Fredrick et al.,2014.

O autor conclui que o uso de televisionamento é confiável para a determinação das estimativas geotécnicas.

3 METODOLOGIA

A pesquisa dessa dissertação foi feita com base nos dados obtidos de uma jazida polimetálica localizada em Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul. As Amostras dos furos de sondagem e as informações da perfilagem geofísica foram coletadas para a realização da classificação geomecânica e posteriormente comparar os resultados obtidos pelos métodos utilizados. No total, foram escolhidos dois furos de sondagem com média de profundidade de 150 metros. A escolha foi feita visando obter uma quantidade representativa de dados da região para calibração do maciço rochoso. De acordo com Fredrick (2014), para calibrar a classificação geomecânica com o uso de perfilagem é necessário dois a quatro furos e um comprimento total de análise de 200 a 500 metros perfilados. Baseado nessa quantidade utilizou-se dois furos e um total de 294 metros de comprimento total.

Foi utilizado o método desenvolvido por Bieniawski (1973, 1989), o Rock Mass Rating ou RMR, por ser um método de Classificação geomecânica largamente empregado na mineração.

3.1 CLASSIFICAÇÃO POR AVALIAÇÃO DE TESTEMUNHOS DE SONDAJEM

O procedimento para classificar os furos de sondagem com base no sistema RMR passa obrigatoriamente por uma série de etapas desde a retirada das amostras de rocha do barrilhete, transporte cuidadoso dos testemunhos de rocha para o galpão, catalogação e medição dos parâmetros mecânicos e aspectos geológicos e estruturais dos testemunhos para posteriormente classificá-la geomecanicamente.

Inicialmente os furos foram extraídos durante a exploração e desenvolvimento da mina. Os testemunhos foram depositados em caixas previamente identificadas. Nessa etapa também foram anotadas as profundidades iniciais, finais e recuperação dos testemunhos (Figura 27).



Figura 27: Caixa de testemunhos com registro do trecho e recuperação obtidos.

Fonte: Autoria Própria, Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro LPM – UFRGS.

Em seguida os testemunhos de rocha foram encaminhados ao laboratório de Pesquisa Mineral da UFRGS para ser analisado e ter o máximo de informações coletadas de forma criteriosa e em detalhes para a classificação geomecânica. As etapas de análise e descrição dos furos são sequenciadas da seguinte maneira:

a) Registro fotográfico das caixas de testemunho

Os testemunhos devem ser fotografados nas suas caixas com o objetivo de ter uma documentação de todo o trecho recuperado, assim como servir para consultas posteriores.

b) Descrição geológica

A rocha deve ser descrita com o máximo de riqueza de detalhes englobando o tipo de rocha, tamanho de grãos, textura e mineralogia.

c) Identificação das descontinuidades

Etapa de grande importância, é nessa etapa que é possível identificar as descontinuidades naturais e induzidas nos testemunhos. As descontinuidades naturais identificadas são: clivagem, bandamento, xistosidade, fratura no cimento da rocha, zona cisalhada, falhas, enquanto que as fraturas induzidas formadas durante a sondagem, manuseio e transporte dos testemunhos, são generalizadas e denominadas de fraturas mecânicas. Com prática é possível verificar os sinais que as diferenciam. As descontinuidades mecânicas não entram na contagem e a devida identificação impacta diretamente no peso da Classificação geomecânica no que range o espaçamento e as condições ambientais das descontinuidades.

Além disso são utilizadas notações para identificar regiões com importância geotécnica. São características relevantes a presença de falhas, zonas de cisalhamento, zona de intenso faturamento, de mineralização.

d) Determinação do Rock Quality Designation (RQD)

Com a identificação das descontinuidades naturais e auxílio de uma trena são medidos os corpos de prova de rocha intacta maior e iguais a 10 centímetros.

e) Identificação das características das descontinuidades (rugosidade, preenchimento, intemperismo)

Todas as descontinuidades são avaliadas quanto a rugosidade, preenchimento e alteração. Como dentro de uma mesma zona pode haver variações nos valores encontrados para esses parâmetros, devem ser levados mais em consideração os valores médios do que os piores (NGI,1998).

A rugosidade é classificada de acordo com a Figura 4, o intemperismo recebe uma avaliação qualitativa (W1 a W5, do menos alterado ao mais, respectivamente). O preenchimento da descontinuidade deve ser mencionado quando houver, assim como sua

espessura (*gouge*) e se duro ou mole. Na análise de testemunhos, infelizmente não há como medir parâmetros de abertura e continuidade da junta.

f) Resistência à compressão da rocha intacta

Esse parâmetro pode ser estimado pelo uso de martelo de Schmidt ou medido através de ensaio. Para essa dissertação foram consideradas as medições realizadas com o uso de martelo de Schmidt.

3.2 CLASSIFICAÇÃO POR AVALIAÇÃO DE IMAGENS DE FUROS PERFILADOS

A classificação do maciço rochoso por imagens segue a mesma lógica da classificação feita em testemunhos de sondagem. No entanto, ainda não existe padronização de norma para descrição dos testemunhos virtuais, sendo utilizado no estudo de caso a classificação geomecânica com base nas normas dos testemunhos físicos, como a IRSM (1978). Oliveira (2015) optou por seguir a mesma norma adaptando alguns parâmetros para a necessidade do televisionamento de furo.

O procedimento para classificação por imagens é feito no computador com o uso do *software WellCad 4.4*[®]. Nele é possível marcar as discontinuidades, determinar espessura da abertura ou preenchimento, rugosidade, alteração e ainda é classificar zonas quanto a litologia (Figura 28),

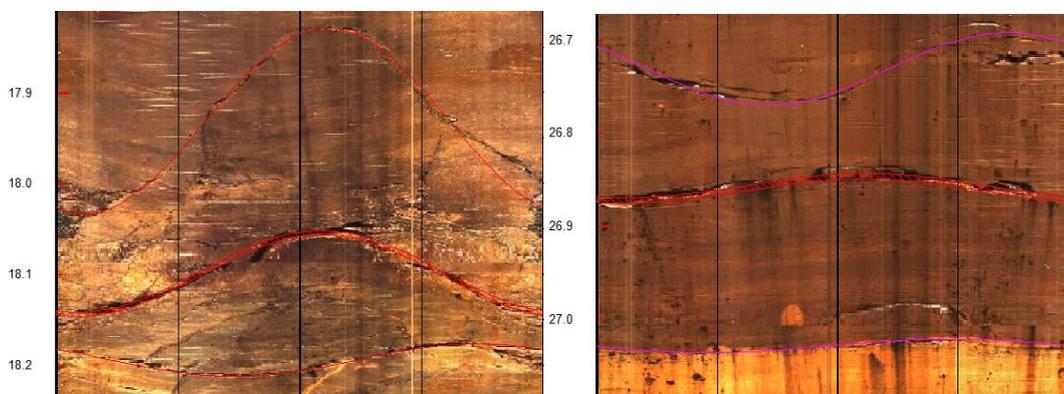


Figura 28: Exemplo de marcação de fratura em furos de Caçapava do Sul.

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Nesta dissertação, optou-se por fazer a descrição baseada na metodologia sugerida por Oliveira (2015), a qual procura contornar algumas dificuldades encontradas ao tentar se aplicar a metodologia de descrição padrão utilizada em testemunhos de sondagem. Porém a descrição deste trabalho tem um enfoque na classificação geomecânica *Rock Mass Rating*, se atendo a características que influenciarão nos parâmetros que compõem a classificação. A descrição proposta por Oliveira (2015) consiste na seguinte sequência:

1. Rocha Intacta

2. Descontinuidades

2.a) Tipo de estrutura

2.b) Rugosidade

2.c) Abertura

2.d) Preenchimento, percolação de água e condições das alterações das paredes das descontinuidades.

2.e) Grau de Fraturamento

2.f) Rock Quality Designation (RQD) Teórico

3.2.1 Rocha intacta

Essa etapa consiste em descrever as rochas que circunvizinham as aberturas por sua imagem detalhando o maior número das características visíveis. Os parâmetros que se busca obter é a descrição dos litotipos, estrutura, textura, composição mineralógica e seu grau de alteração. O testemunho virtual deve ser dividido em zonas sempre que houver mudanças desses parâmetros, principalmente com a mudança do grau de alteração, domínios estruturais e litológicos diferentes. O uso dos softwares é recomendado para a descrição de cada trecho. Outros aspectos como foliação, xistosidade, bandamento, veios, dobramentos, etc., também são interessantes de serem descritos pois podem influenciar no comportamento geomecânico.

Tabela 9: Exemplo de tabela de classificação de rocha intacta.

FURO 132			TABELA – ROCHA INTACTA				
PROF. (m)	ESPESSURA (m)	LITOLOGIA	UNIDADE	ESTRUTURA	TEXTURA	COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA	GRAU DE ALTERAÇÃO
19,92	0,32	Gnaisse	Embasa- mento da Bacia de São Paulo	Gnáissica, minerais orientados, foliação incipiente. Presença de veios de quartzo- feldspáticos centimétricos	Inequi- granular, média/ grossa, cristais tabulares de feldspato.	Quartzo, Feldspato, minerais máficos (biotita e etc).	II
20,24	4,08						I
24,32	0,38						II
24,7	1,00						I
25,7	2,80						II
28,5	0,95						I
29,45	0,19						II
29,64	7,21						I
36,85	0,72						II
37,57	3,26						I
40,83	0,95						II
41,78	8,40						III
50,18	Fim do furo						

Fonte: Oliveira, 2015.

Com relação ao estado de alteração da rocha, pode ser avaliado pela rugosidade da parede da abertura, o que implicaria na perda de material das paredes durante a perfuração. Também pode ser notado sinal de alteração pela perda de brilho da rocha.

Conforme sugerido por Oliveira *et al.* (2015) pode-se usar a tabela adaptada de ISRM (1978) para caracterizar melhor o grau de alteração da rocha.

Tabela 10: Graus de alteração do maciço rochoso

SIGLAS	DENOMINAÇÕES	CARACTERÍSTICAS DA ROCHA
I	Rocha sã ou praticamente sã	Ausência de sinais de material rochoso alterado ou minerais ligeiramente descoloridos. Minerais com brilho.
II	Rocha medianamente alterada	Apresentam minerais com menor brilho e a rocha é bastante descolorida.
III	Rocha muito alterada	Apresentam minerais sem brilho e a rocha é bastante descolorida. Menos que a metade do material rochoso está decomposto ou desintegrado.
IV (IV a VI)	Rocha extremamente alterada	Apresentam minerais totalmente sem brilho e a rocha é intensamente descolorida. Mais do que a metade do material está decomposto ou desintegrado, solo.

Fonte: Oliveira, 2015 adaptado de ISRM, 1978 e Serra Junior & Ojima, 1998.

3.2.2 Descontinuidades

a) Tipos de estrutura

Nesse ponto, Oliveira (2015) destaca a importância de se diferenciar às descontinuidades. Estruturas como acamadamentos, bandamentos, veios, dobras, contatos litológicos e fraturas naturais. Tal informação é importante devido à influência nos projetos de engenharia.

b) Rugosidade das paredes das descontinuidades

A rugosidade da parede das descontinuidades pode ser avaliada conforme foi explicada no item 3.3.3.2, sendo uma medida visual de o quanto o contato da descontinuidade se afasta da linha média. No caso, a descontinuidade é avaliada considerando o quão irregular o contato está em relação a senoide marcada na imagem. Oliveira (2015) sugere um uso da classificação de Barton (1987) conforme a figura 29, sendo classificada somente como rugosa, lisa ou polida. O termo “polida” só pode ser utilizado caso haja evidência de deslocamento e cisalhamento (ISRM, 1978).

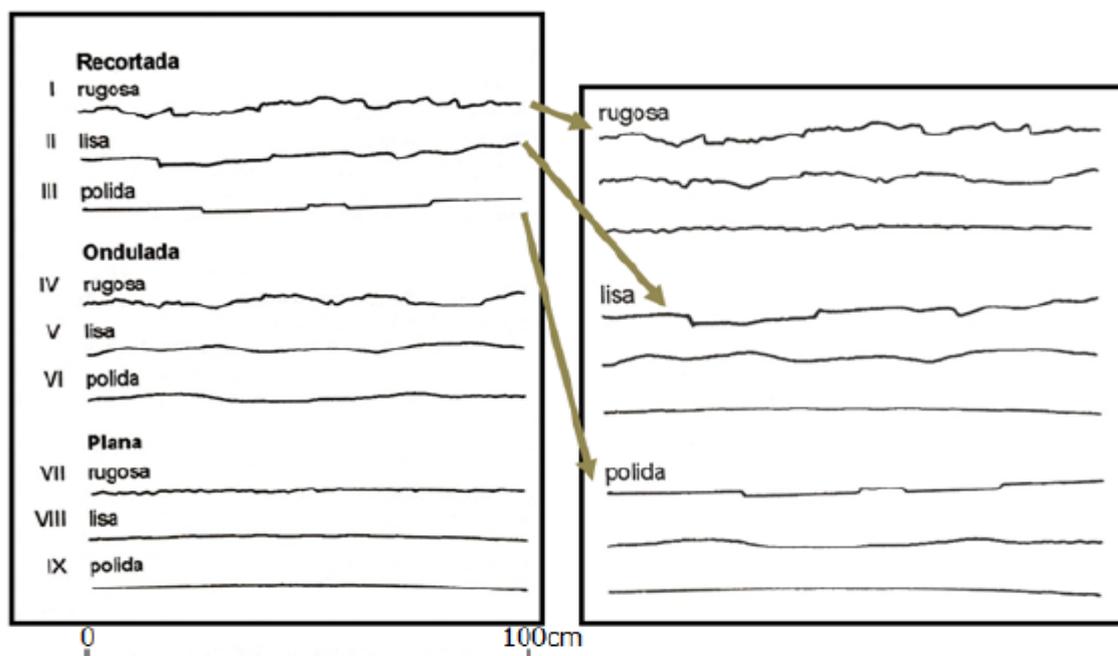


Figura 29: Perfis de rugosidade de Barton (1987) à esquerda, e adaptação dos perfis para aplicação em imagens de televisionamento à direita

Fonte: Oliveira, 2015.

c) Abertura

Oliveira (2015) sugere que a classificação da abertura seja feita nos termos fechada, semi-aberta e aberta indicando a espessura da abertura. Para classificação geomecânica, a espessura da abertura já é o suficiente para a ponderação desse parâmetro.

Tabela 11: Classificação das aberturas das descontinuidades

ABERTURA	DESCRIÇÃO	
<0,1 mm	Muito Apertado	Feições Fechadas
0,1 - 0,25 mm	Apertado	
0,25 - 0,50 mm	Parcialmente Aberto	
0,50 - 2,50 mm	Aberto	Feições semi - abertas
2,50 - 10 mm	Moderadamente Largo	
>10 mm	Largo	
1 - 10 cm	Muito Largo	Feições Abertas
10 - 100 cm	Extremamente largo	
> 1 m	Cavidade	

Fonte: ISRM, 1978.

d) Preenchimento, percolação de água e condições de alterações das paredes

Para as condições de alteração da parede, assim como da rocha intacta é levado em consideração o brilho, o aspecto textural da rocha e sinais de oxidação. Oliveira (2015) ainda ressalta a importância de se conhecer a litologia da região para possíveis ajustes na avaliação.

O preenchimento pode ser classificado de acordo com a Tabela 12, a qual foi adaptada para poder ser aplicada ao televisionamento óptico.

Tabela 12: Caracterização do preenchimento

SIGLA	CONDIÇÕES DE ALTERAÇÃO E PREENCHIMENTO DAS PAREDES DE DESCONTINUIDADES
D1	Contato rocha-rocha, paredes sãs, sem preenchimento, brilho intenso.
D2	Contato rocha-rocha, preenchimento de material pétreo rijo (calcita, quartzo, epidoto).
D3	Paredes com alteração incipiente, brilho mais fraco, sinais de percolação d'água, oxidadas, sem preenchimento.
D4	Paredes alteradas, brilho fraco, preenchimento ausente, fratura aberta.
D5	Paredes alteradas, sem brilho, com preenchimento de fragmentos de rocha.
D6	Paredes alteradas, sem brilho, com preenchimento de argila e/ou areia (detalhar).
D7	Paredes alteradas, sem brilho, com preenchimento distinto ou não identificado (detalhar).

Fonte: IPT (1984) modificado por Oliveira (2015).

É interessante ressaltar que essa tabela traz tantas informações sobre o preenchimento quanto sobre a alteração da rocha e se ela está em contato ou não. Tal classificação teria uma aplicação mais direta na classificação do sistema-Q, ou seja, ao caracterizar a rocha segundo o esquema proposto por Oliveira (2015). Como o objetivo deste trabalho é classificar de acordo com o sistema RMR, alguns detalhes podem ser perdidos com essa classificação, o que será avaliado nos resultados.

e) Grau de faturamento

O grau de faturamento pode ser calculado em função da distância entre cada fratura, onde é computado o número de fraturas por metro e classificado de acordo com a Tabela 13.

Tabela 13: Grau de Fraturamento.

SIGLAS	FRATURAS/m	DENOMINAÇÕES DO MACIÇO
F1	<1	Ocasionalmente fraturado
F2	1 a 5	Pouco Fraturado
F3	6 a 10	Medianamente Fraturado
F4	11 a 20	Muito fraturado
F5	>20	Extremamente fraturado

Fonte: IPT, 1984.

f) Rock Quality Designation teórico

O RQD teórico, obtido no televisionamento é análogo ao obtido na técnica scanline. Oliveira (2015) aconselha a utilizar equação que empreguem o parâmetro λ (espaçamento médio das descontinuidades):

$$\text{Priest \& Hudson (1976)} \quad \text{RQD}^* = 100e^{-0,1 \lambda (0,1\lambda+1)}$$

Aconselha-se ainda a comparação do RQD teórico com o RQD obtido nos testemunhos de sondagem.

3.3 ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Um ponto importante na classificação é a determinação da resistência à compressão da rocha intacta. Para fazer essa estimativa utilizou-se métodos diretos e indiretos, conforme foi explorado no item 2.4.1. Para a dissertação foi utilizado a técnica de estimativa com o uso de medida de velocidade ultrassônica da rocha, utilizando o equipamento PUNDIT[®].

O Pundit[®] (*Portable Ultrasonic Nondestructive Index Tester*) mede a velocidade de propagação de onda ultrassônica que atravessam as rochas. Os ensaios são simples e com baixo custo, necessitando somente uma preparação das superfícies das amostras que serão ensaiadas (Figura 30). Esse método de ensaio descreve as medições laboratoriais das velocidades das ondas de compressão (onda P) e cisalhamento (onda S) da rocha.



Figura 30: Equipamento de medição de velocidade ultrassônica utilizado nos ensaios.

Utilizando a velocidade de propagação da onda P nas rochas buscou-se obter uma curva de correlação entre esta e a resistência à compressão uniaxial, obtida nos ensaios destrutivos com a prensa hidráulica.

Os ensaios foram todos realizados com onda P, e a frequência de trabalho da onda aplicada foi de 54 kHz.

3.3.1 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova a serem ensaiados necessitam satisfazer as implicações dos dois ensaios, primeiramente foi realizada a medida da velocidade da onda compressiva, método não destrutivo, e posteriormente foi realizado o ensaio de resistência à compressão destrutivo. Um levantamento foi realizado e mostrado as implicações dos principais requisitos para os ensaios:

- Os corpos de prova deverão apresentar diâmetro “NX”, aproximadamente 54,00 milímetros
- Os corpos de prova deverão apresentar na forma cilíndrica com relação entre base e altura de 2:1 até 2,5:1;
- As faces das amostras devem ser, obrigatoriamente, planas e paralelas entre si (com uma tolerância máxima de 0,02 mm);
- Não pode ter aplicações de aditivos (colas, massa) para tratamento nas faces das amostras;

Após a preparação dos corpos de prova, elas são catalogas e numeradas em ordem crescente. Detalhes como massa, comprimento, diâmetro são anotados na ficha descritiva. As mesmas são fotografadas e inseridas no banco de dados do laboratório para posterior estudo.

As amostras foram preparadas de forma que a estratificação das rochas ficou perpendicular a passagem da onda (Figura 32).

3.3.2 Seleção das amostras

De acordo com Soroush e Qutob (2011) a relação entre velocidade de onda P e resistência à compressão está intimamente ligado ao tipo de rocha analisada (Figura 31). Isso deve-se à variação no modo como a onda vai ser transmitida de acordo com a formação geológica, se é clástica, ígnea ou metamórfica, os quais se somam a inúmeros fatores como: densidade, porosidade e microfraturas.

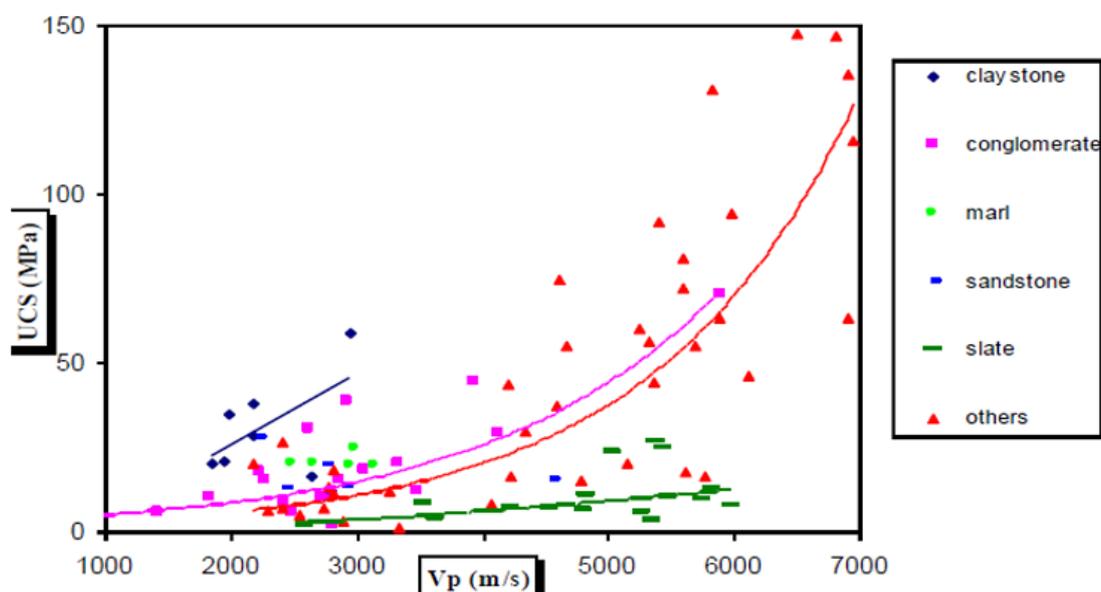


Figura 31: Correlação entre Vp e UCS para diferentes tipos de rochas.

Fonte: Soroush e Qutob, 2011.

Com base nessa ideia foi estabelecido que a análise seria feita pelo tipo de rocha, onde grupos de rochas com características semelhantes seriam analisados para se buscar correlações matemáticas por litologia, e correlações globais.



Figura 32: Amostras de arenito, conglomerado e ritmito, respectivamente

Fonte: Autoria Própria, Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro LPM – UFRGS

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para esta dissertação foi escolhido o estudo de caso o ambiente geológico de Caçapava do Sul, em uma localidade com potencial mineiro com os direitos minerários de exploração atribuídos a Nexa Resources. Nesse ambiente, dois furos de sondagem foram estudados, os quais tiveram descrição geológica, descrição geotécnica e ensaios laboratoriais, gerando um volume significativo de dados. Ainda há a apresentação dos resultados com o gráfico de correlação entre a velocidade de onda P e resistência à compressão.

4.1 ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DA ROCHA INTACTA

Como já mencionado anteriormente, um dos parâmetros para a composição dos pesos da Classificação Geomecânica é a resistência a compressão da Rocha intacta podendo ser medido a partir de métodos diretos (prensa hidráulica) ou estimado por métodos indiretos como o uso de medidas de velocidade ultrassônica. Nesta dissertação foram utilizados 185 corpos de prova de diferentes tipos litológicos, todos foram catalogados e medidos a velocidade da onda compressiva que atravessa o corpo de prova.

Na literatura são descritos os diversos fatores que afetam a velocidade da onda compressiva ao atravessar a rocha, entre elas: porosidade, saturação em fluidos, presença de fraturas, anisotropia, litologia, intemperismo, inclusive os fatores operacionais durante a medição afetam as medidas feitas.

Diante disso, foram feitas as medidas e registrou-se diferentes regressões entre a resistência à compressão da rocha e a velocidade da onda compressiva (Figura 33). Foram utilizados corpos de provas que representassem as principais rochas presentes nos furos analisados, sendo elas: arenito, conglomerado e ritmito.

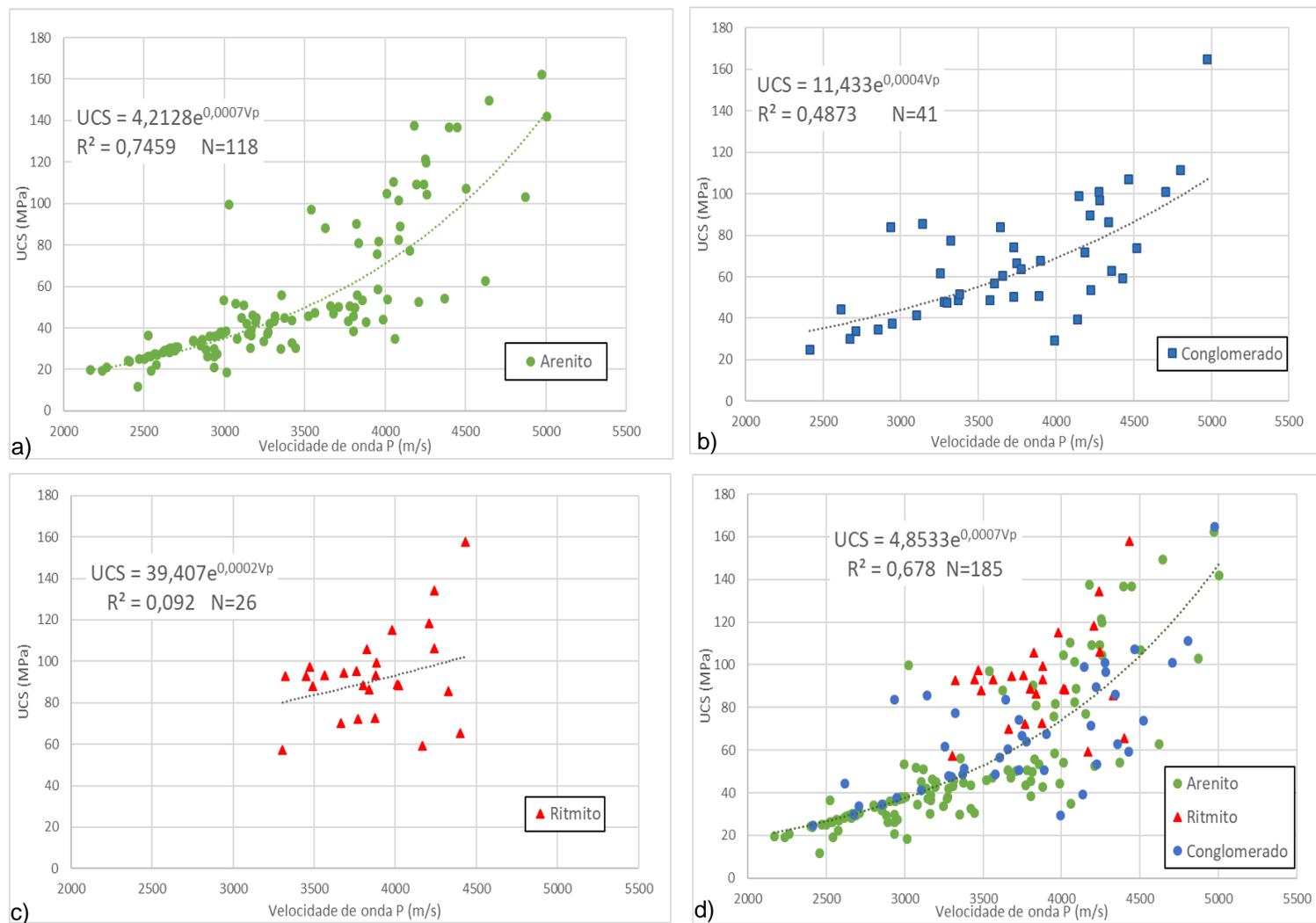


Figura 33: Curva de regressão entre velocidade de onda P e resistência à compressão para as litologias presentes nos furos.

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Dentre as diferentes correlações obtidas é possível observar que analisando rochas separadamente, observa-se diferentes nuvens de pontos, o que mostra características particulares de cada corpo de prova e litologia. Esse mesmo comportamento é mostrado em Soroush e Qutob (2011), mostrando a necessidade de se analisar as diferentes litologias separadamente para desenvolver uma melhor estimativa.

No entanto, somente o arenito apresentou uma melhora no resultado quando analisado individualmente. Tal fato por ser explicado pela heterogeneidade das amostras de ritmito e de conglomerado. O ritmito é o resultado de estratificações de diferentes granulometrias, variando de tamanho argila/silte a fina/média; e o conglomerado apresenta fragmentos de rocha em uma matriz fina. Portanto ambos apresentam variações consideráveis, não traduzindo um comportamento muito bem correlacionável.

Analisando trabalhos de diferentes autores também foi possível confirmar que arenitos de diferentes ambientes geológicos apresentam equações de regressão semelhantes, mas não iguais (Figura 34), o que confirma um comportamento baseado no tipo de material.

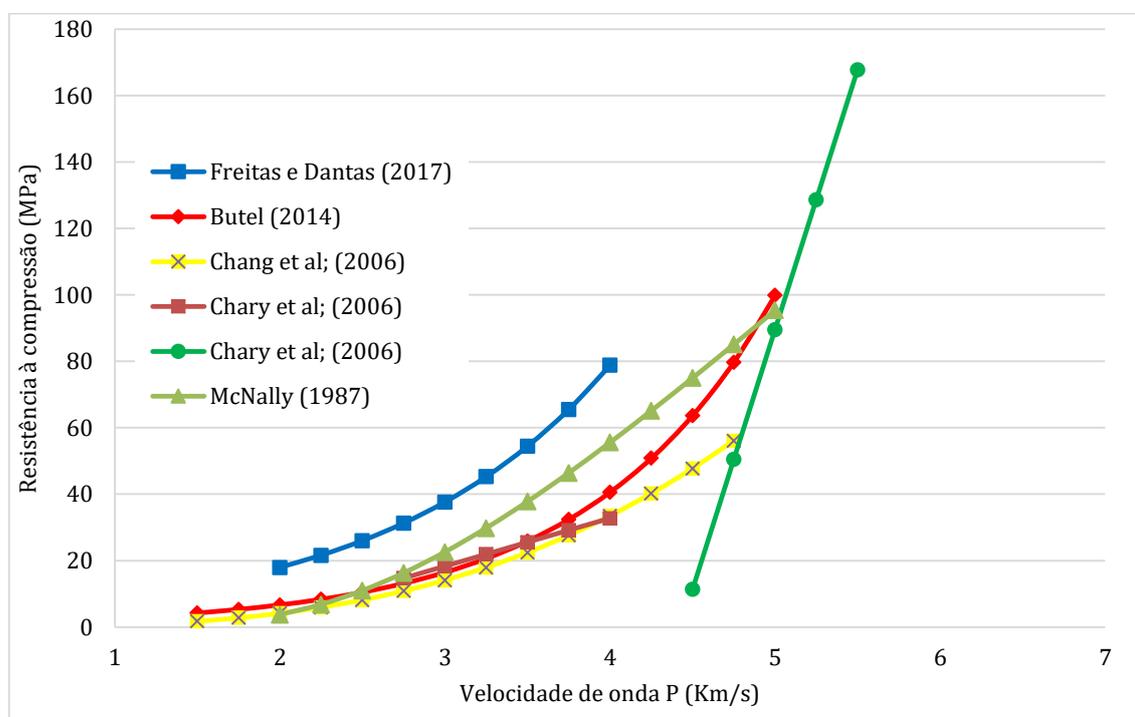


Figura 34: Correlações obtidas para arenitos por diferentes autores.

Fonte: Freitas e Dantas, 2017.

Baseado nessas informações levantou-se uma hipótese neste trabalho: quanto mais específica for a rocha, melhor será a sua correlação? Para buscar a resposta para este questionamento foi feita uma análise detalhada no grupo dos corpos de prova do arenito, subdividindo-o em grupos mais específicos a fim de se analisar o coeficiente de correlação obtido com a análise (Tabela 14 e Figura 35).

Tabela 14: Coeficiente de correlação para cada tipo de arenito.

Granulometria	Número de amostras	R ²
Arenito (todos)	118	0,736
Arenito Fino	53	0,752
Arenito Fino-Médio	17	0,199
Arenito Fino-Grosso	24	0,876
Arenito Médio	4	0,776
Arenito Médio-Grosso	20	0,780

Fonte: Autoria Própria, 2018.

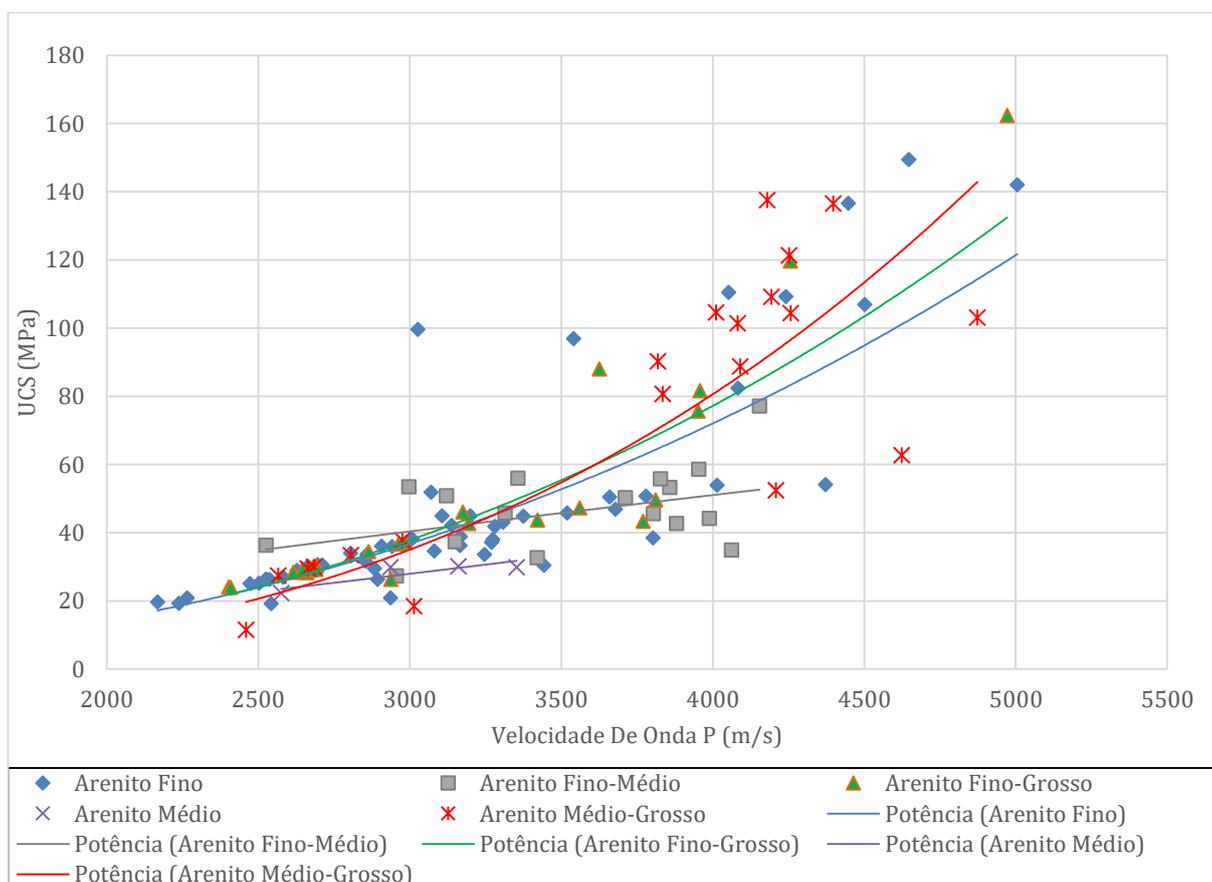


Figura 35: Diferença de linhas de tendência para arenitos de diferentes granulometrias em correlação Vp x UCS

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Analisando a Tabela 14 fica evidente que houve um aumento do coeficiente de determinação para a maior parte dos grupos analisados. Somente um dos grupos não apresentou melhora, o “Arenito Fino-Médio”, porém analisando a dispersão de pontos, pode-se ver que ele apresenta um bom padrão de correlação. Sendo assim, o motivo por não apresentar um bom coeficiente de correlação é devido ao fato de dispersão estar na horizontal, o que impacta negativamente no cálculo do R^2 .

Desta forma, é possível concluir que optar por levantamento dos dados para grupos mais específicos deve aumentar a confiança das estimativas feitas.

Apesar da conclusão, a subdivisão para as três classes de rocha encontradas no maciço rochoso não foi benéfica devido aos resultados para correlações isoladas de ritmito e conglomerado. Para lidar com essas correlações baixas optou-se por analisar os dados de uma forma global. Esta ação pode ser justificada devido ao fato que nesta dissertação todas as rochas apresentam formação geológica semelhante (rochas provenientes de bacia sedimentar), sendo assim é possível agrupá-las em uma correlação única sem grande prejuízo. Para melhorar a confiança da regressão será necessário realizar mais ensaios na litologia ritmito a fim de identificar se ele deveria ser separado em um outro grupo ou poderia ser incluído nos arenitos e conglomerados.

4.2 DESCRIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS TESTEMUNHOS DE SONDAGEM

Embora a ideia da classificação geomecânica seja separar por zonas, os furos foram classificados com um grau de detalhamento maior, sendo separados por manobras (Figura 36). A descrição também se restringiu aos parâmetros considerados para a classificação do sistema Rock Mass Rating, atendo-se assim às informações necessárias para classificar os testemunhos de acordo com o sistema.

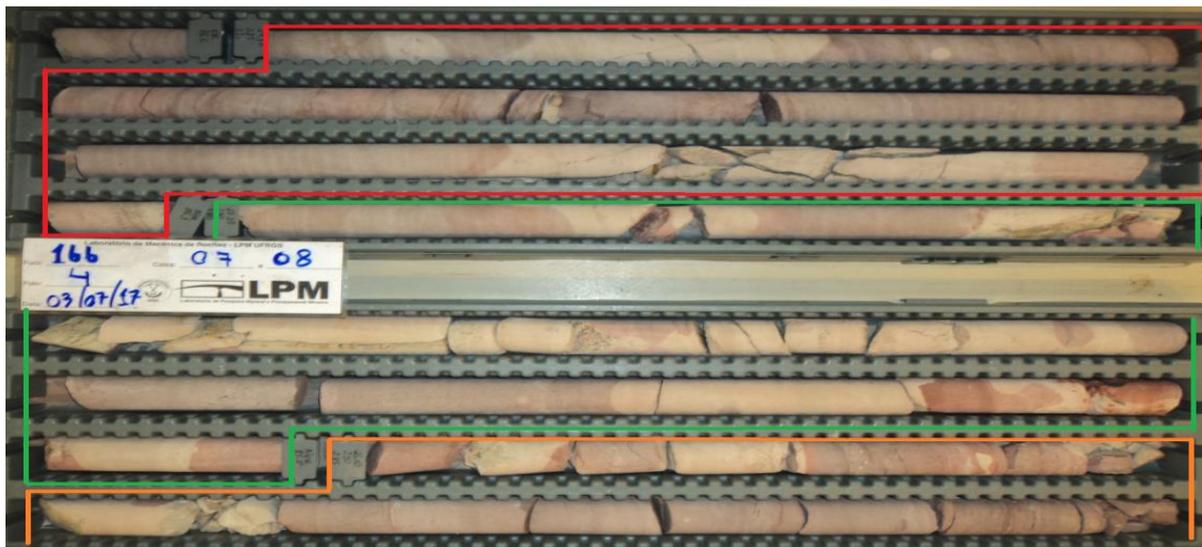


Figura 36: Caixas de testemunhos com separação por manobras em diferentes cores.

Fonte: autoria própria, Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro LPM – UFRGS

Dentro da rotina de análise das descrições dos testemunhos todas as etapas foram feitas de forma padronizada. As caixas de testemunhos foram sistematicamente fotografadas, e analisadas quanto a geologia, recuperação, número e tipo das descontinuidades, grau de alteração e preenchimento.

Os resultados das descrições podem ser vistos na Tabela 15. A geologia e o padrão de faturamento do maciço se mostraram bastante constantes, dessa forma, não se identificou a necessidade de subdividir a classificação em trechos menores.

A geologia dos dois furos analisados era composta de material sedimentar, alternando entre arenitos, ritmitos e conglomerados. Não houve dificuldade na identificação uma vez que o material em sua maior parte era bem competente e com pouca alteração, a perda de material ocorreu em poucos trechos durante a sondagem.

Quanto a identificação das descontinuidades, foi necessário trabalhar com bastante atenção para diferenciar fraturas naturais das rochas das descontinuidades produzidas durante a operação da sondagem, manuseio ou durante o transporte. Para fazer isso, sempre tentava-se encaixar os testemunhos, se o encaixe fosse perfeito tal ponto não era contabilizado.

Já quanto as características das descontinuidades, algumas informações acabavam se perdendo devido ao processo de sondagem. Se perdia a informação da abertura das descontinuidades, além de informações como a composição de preenchimentos menos competentes.

Tabela 15: Descrição dos testemunhos dos primeiros metros do furo 166 (células em azul representam valores calculados).

Intervalo (zona)		Recuperação Total			Rocha	RQD		Espaçamento (m)	Grau alteração	Numero Fraturas	Grau fraturamento	Fratura por metro	Descontinuidades					UCS (Rebote)	UCS Rocha (MPa)	Observações
De	Para	Espessura	Rec (m)	(%)		(m)	(%)						Tipo	Rugosidade	Grau alteração	Preenchimento				
													Qtd	Espess (mm)	Duro (1) Mole (0)					
0,00	0,50	0,50	0,15	30%	Solo		0	2,00	W5		F5	0,00		0	W5				0	
0,50	1,20	0,70	0,70	100%	Solo		0	2,00	W5		F5	0,00		0	W5				0	
1,20	1,80	0,60	0,60	100%	Solo		0	2,00	W5		F5	0,00		0	W5				0	
1,80	2,95	1,15	1,15	100%	Arenito	0,13	11	2,00	W2		F5	0,00	FR	2	W2				0	Zona fraturada
2,95	3,95	1,00	0,95	95%	Arenito	0,35	35	2,00	W2		F5	0,00	FR	2	W2				0	Zona fraturada
3,95	7,05	3,10	3,10	100%	Arenito	2,76	89	0,31	W2	10	F2	3,23	FR	2	W2			42,0	38	
7,05	10,10	3,05	2,95	97%	Arenito	2,66	87	0,34	W2	9	F2	3,05	FR	2	W2			50,0	56,67	
10,10	13,20	3,10	3,10	100%	Arenito	3,00	97	0,34	W2	9	F2	2,90	FR	1	W2			50,0	56,67	
13,20	16,30	3,10	3,00	97%	Arenito	2,65	85	0,39	W2	8	F2	2,67	FR	1	W2			48,0	52,00	
16,30	18,05	1,75	1,65	94%	Arenito	1,08	62	0,18	W2	10	F3	6,06	FR	1	W3			40,0	33,33	Região com alteração
18,05	19,30	1,25	1,25	100%	Arenito	0,95	76	0,18	W2	7	F3	5,60	FR	2	W3			40,0	33,33	Região com alteração
19,30	22,20	2,90	2,80	97%	Arenito	2,23	77	0,48	W2	6	F2	2,14	FR	2	W3			48,0	52,00	Região com alteração
22,20	25,10	2,90	2,85	98%	Arenito	1,89	65	0,48	W2	6	F2	2,11	FR	1	W3			40,0	33,33	Região muito alterada, bege clara, fraturada
25,10	27,55	2,45	2,25	92%	Arenito	1,50	61	0,27	W2	9	F2	4,00	FR	2	W2			40,0	33,33	Algumas fraturas no bandamento
27,55	30,65	3,10	3,10	100%	Arenito	2,58	83	0,22	W2	14	F2	4,52	FR	2	W2			50,0	56,67	Algumas fraturas no bandamento
30,65	33,75	3,10	3,00	97%	Arenito	2,12	68	0,17	W2	18	F3	6,00	FR	2	W2			48,0	52,00	Linhas de fratura não abertas, fraturas no bandamento
33,75	36,70	2,95	2,90	98%	Arenito	2,65	90	0,33	W2	9	F2	3,10	FR	2	W2			54,0	66,00	
36,70	39,60	2,90	2,85	98%	Arenito	1,95	67	0,26	W2	11	F2	3,86	FR	2	W2			50,0	56,67	Há muitas fraturas no bandamento
39,60	42,50	2,90	2,85	98%	Arenito	2,14	74	0,24	W2	12	F2	4,21	FR	2	W2			52,0	61,33	Há fraturas no bandamento
42,50	45,40	2,90	2,90	100%	Ritmito	2,55	88	0,29	W2	10	F2	3,45	FR	2	W2			50,0	56,67	Há fraturas no bandamento
45,40	48,30	2,90	2,85	98%	Ritmito	2,41	83	0,41	W2	7	F2	2,46	FR	2	W2			50,0	56,67	Há fraturas no bandamento, esverdeado devido a alteração.
48,30	51,20	2,90	2,80	97%	Ritmito	2,55	88	0,41	W2	7	F2	2,50	FR	2	W2			55,0	68,33	Há fraturas no bandamento
51,20	54,10	2,90	2,75	95%	Ritmito	2,66	92	0,58	W2	5	F2	1,82	FR	1	W2			40,0	33,33	Região áspera, com poros
54,10	57,00	2,90	2,90	100%	Ritmito	2,55	88	0,41	W2	7	F2	2,41	FR	1	W2			55,0	68,33	Há fraturas no bandamento
57,00	59,90	2,90	2,65	91%	Ritmito	2,36	81	0,48	W2	6	F2	2,26	FR	3	W2			52,0	61,33	30cm frágil, alterado
59,90	62,80	2,90	2,90	100%	Ritmito	2,53	87	0,36	W2	8	F2	2,76	FR	2	W2			45,0	45,00	1m com alteração, poros. Fraturas fechadas

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Com base na descrição dos testemunhos foi feita a classificação geomecânica de acordo com o sistema Rock Mass Rating (RMR). Para a classificação geomecânica optou-se por utilizar as tabelas de conversão dos diferentes parâmetros (Apêndice A), e as tabelas 5 e 10 são utilizadas para compor os parâmetros restantes que somados e classificados, o RMR varia de 0 a 100, Classe I a V.

Entretanto, há alguns parâmetros que não podem ser determinados nos testemunhos de sondagem, como a abertura das descontinuidades e persistência, por isso é atribuído um valor médio a esses parâmetros. O parâmetro referente a presença de água é atribuído como “Pingos”, recebendo um valor igual a 10, tendo em vista a provável condição de trabalho da futura mina.

A Tabela abaixo mostra a composição final do RMR para cada trecho testemunhado do furo 166.

Tabela 16: Composição do valor de RMR para cada trecho testemunhado (segmento do furo 166).

De	Para	Resistência à compressão (MPa)	RQD	Espaçamento	Condição das descontinuidades	Água	RMR médio
0,00	0,50	1	3	6	12	10	32
0,50	1,20	1	3	6	12	10	32
1,20	1,80	1	3	6	12	10	32
1,80	2,95	1	4	6	19	10	40
2,95	3,95	1	8	6	19	10	44
3,95	7,05	5	18	9	19	10	61
7,05	10,10	6	17	9	19	10	61
10,10	13,20	6	20	9	18	10	63
13,20	16,30	6	17	9	18	10	60
16,30	18,05	4	12	7	16	10	49
18,05	19,30	4	15	7	17	10	53
19,30	22,20	6	15	10	17	10	58
22,20	25,10	4	13	10	16	10	53
25,10	27,55	4	12	8	19	10	53
27,55	30,65	6	17	8	19	10	60
30,65	33,75	6	13	7	19	10	55

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Abaixo pode ser visto o gráfico da classificação RMR dos dois furos, BRSMSM00166 e BRSMSM00172, é possível notar que não há variação da qualidade do maciço rochoso muito expressiva. Os pontos onde a qualidade é baixa são referentes a trechos bastante fraturados.

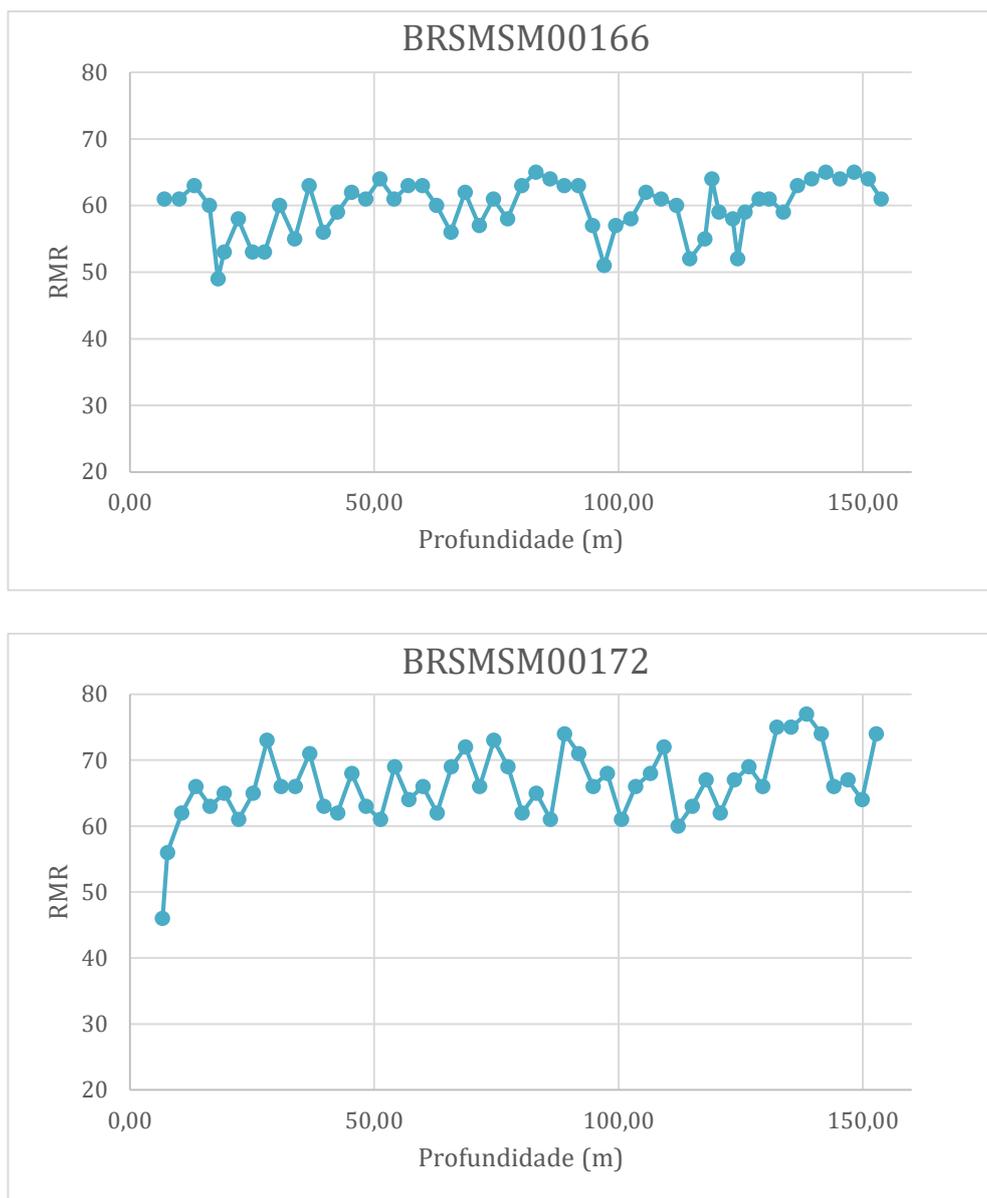


Figura 37: Qualidade quantitativa dos testemunhos de rocha dos furos 172 e 166 com a profundidade.

Fonte: Autoria Própria, 2018.

4.3 DESCRIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO FURO A PARTIR DE IMAGENS E COMPARAÇÃO COM CLASSIFICAÇÃO POR TESTEMUNHOS

Com a intenção de comparar os resultados entre os sistemas adotados para a classificação geomecânica, o sistema de separação das zonas foi o mesmo utilizado para a classificação dos testemunhos que é o comprimento do barrilhete que varia de 3,05 a 3,10 metros de comprimento.

4.3.1 Informações geológicas

Nas imagens obtidas, é possível ver com clareza os contatos litológicos, bandamentos, estratificações e estimar algumas informações litológicas. Na Figura 38 fica evidente que a identificação da litologia se dá pela mudança das cores, com a descida da sonda, uma vez que características como brilho e percepção de textura visual se perdem com a resolução do equipamento. A identificação da rocha somente baseada na imagem é difícil, tendo em vista que a cor da imagem obtida pelo OPTV é diferente da cor real (figura 38 e 39), já que a luz é gerada pelas lanternas do equipamento, além disso a resolução dificulta ver mais detalhes. No entanto, com um conhecimento prévio das rochas da região é possível estimar quais são e conhecimento por outras características como granulometria, planos de acamamento, oxidação, etc.

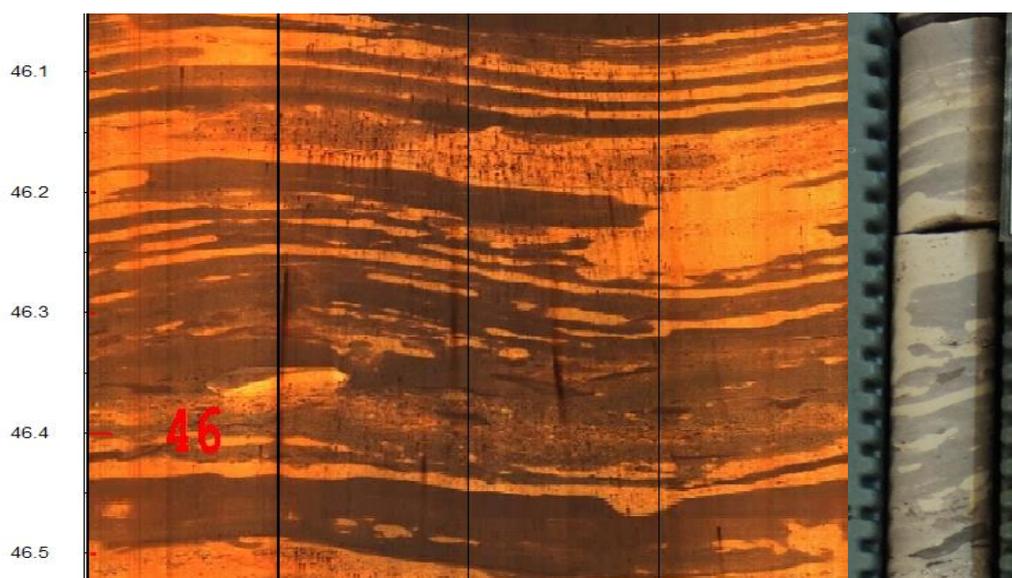


Figura 38: Imagem de OPTV e testemunho. Os bandamentos são as cores mais escuras em ritmo de textura fina.

Fonte: Autoria Própria, 2018.

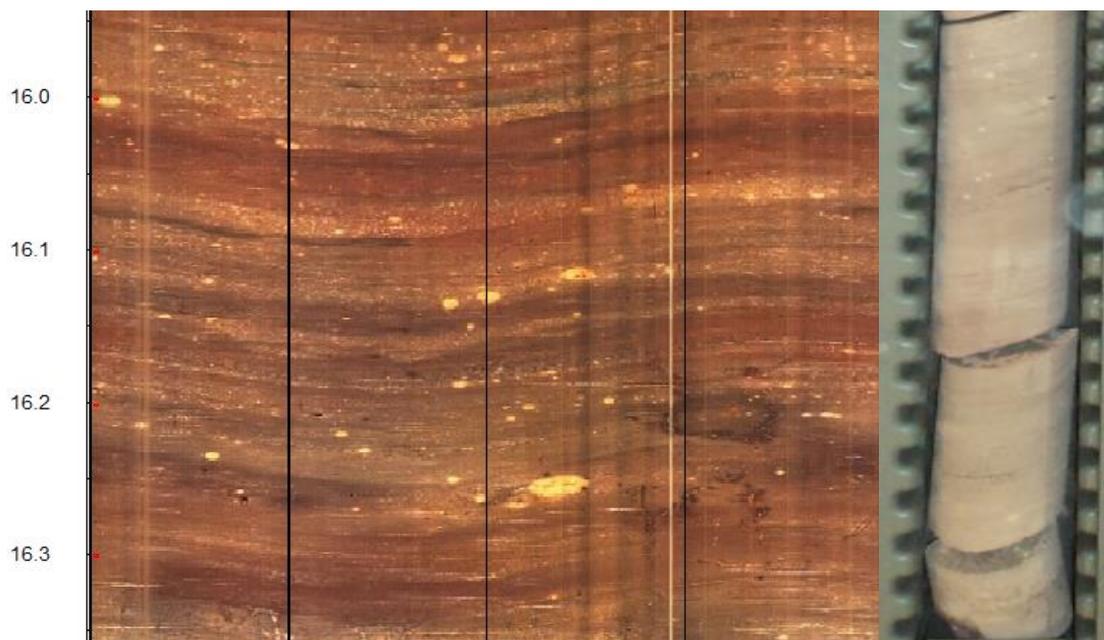


Figura 39: Imagem de OPTV e testemunho. Estratificação do arenito.

Fonte: Autoria Própria, 2018.

A imagem dos dois furos analisados e descritos geram assim uma descrição litológica de todo o comprimento dos furos.

Embora as cores das imagens sejam diferentes das amostras físicas e a resolução seja limitada, a descrição foi feita com relativa segurança, já que o autor pode se familiarizar com as rochas da região. A cor, apesar de não definir mineral ou litologia, ajudou um pouco a chegar a uma classificação. A classificação da textura fica um pouco comprometida, mas é possível observar bem a granulometria dos minerais maiores. Estruturas presentes na rocha também são relativamente fáceis de serem observadas.

Tabela 17: Descrição geológica do Furo 166

Zona	Litologia	Descrição geológica
0 - 5,70 m	Sem leitura OPTV	Revestimento do furo
5,70 – 15,90 m	Possível arenito	Material de cor ocre, variando em tons avermelhados até tons laranja. Apresenta grãos de granulometria areia fina (de maneira geral bem selecionado, apresentando pequenas variações localizadas). Com passagens de lâminas de cor preta e/ou marrom com granulometria areia média, possível
15,90 – 16,30 m	Possível arenito	Material de cor marrom. Apresenta granulometria variando de areia fina à areia
16,30 – 18,90	Possível arenito	Material de cor ocre, variando em tons avermelhados até tons laranja. Apresenta grãos de granulometria areia fina (de maneira geral bem selecionado, apresentando pequenas variações localizadas). Com passagens de lâminas de cor preta e/ou marrom com granulometria areia média, possível oxidação por óxido de manganês. Esta porção se apresenta mais fraturado do
18,90 – 41,50 m	Possível arenito	Material de cor ocre, variando em tons avermelhados até tons laranja. Apresenta grãos de granulometria areia fina (de maneira geral bem selecionado, apresentando pequenas variações localizadas).
41,50 – 43,5 m	Transição arenito - ritmo	Infelizmente nesta região a imagem não dá subsídio para a classificação. Como por muitas vezes as características se misturam, decidiu-se colocar como uma
43,50 – 54,6 m	Possível ritmo	O material apresenta uma forte intercalação (estratificação plano paralela) entre dois materiais, um claro e outro escuro. A parte clara: a sua coloração varia de ocre até amarelo escuro, com granulometria variando de silte/argila e algumas bandas com granulometria de areia fina. A banda escura apresenta cor
54,6 – 59,1 m	Possível arenito	Material de cor ocre, variando em marrom. Apresenta grãos de areia fina (de maneira geral bem selecionada). Presença de passagens de estratos com
59,10 – 61,50 m	Possível arenito	Material de cor alaranjado a ocre claro. Apresenta granulometria areia fina, com passagens de areia média. O material apresenta muitas descontinuidades, como falhas e planos de acamamento. É possível identificar percolações de fluidos (aparentemente óxido de manganês). E presença de camadas de cor
61,50 – 90,00 m	Possível arenito	Material de cor alaranjado a ocre claro. Apresenta granulometria areia fina, com passagens de areia média.
90,00 – 103,40 m	Possível ritmo	O material apresenta uma forte intercalação (estratificação plano paralela) entre dois materiais, um claro e outro escuro. A parte clara: a sua coloração varia de ocre até amarelo escuro, com granulometria variando de silte/argila e algumas bandas com granulometria de areia fina. A banda escura apresenta cor marrom a marrom escuro, apresenta granulometria silte/argila. Este nível encontra-se muito fraturado, apresenta pequenos bolsões e/ou pequenas
103,4 – 137,10 m	Possível ritmo	O material apresenta uma forte intercalação (estratificação plano paralela) entre dois materiais, um claro e outro escuro. A parte clara: a sua coloração varia de ocre até amarelo escuro, com granulometria variando de silte/argila e algumas bandas com granulometria de areia fina. A banda escura: apresenta cor marrom a marrom escuro, apresenta granulometria silte/argila.
137,10 – 151,5 m	Possível arenito conglomerático	Esse intervalo apresenta a presença de dois tipos de materiais o primeiro pode ser classificado como um material de cor ocre, variando em tons avermelhados até tons laranja. Apresenta grãos de granulometria areia fina (de maneira geral bem selecionado, apresentando pequenas variações localizadas). Já o segundo apresenta intercalações entre bandas de arenito, com granulometria variando de areia fina a areia grossa (arenito mal selecionado), podendo chegar até a grânulos. É possível observar bandas de possível pelito, (camadas de um

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Tabela 18: Descrição geológica do furo 172.

Zona	Litologia	Descrição geológica
0 – 4,40 m	Sem leitura OPTV	Revestimento do furo
4,40 – 9,80 m	Possível arenito	Material de cor ocre, variando em tons vermelho vivo até tons laranja. Apresenta grãos de granulometria areia fina (apresenta algumas bandas com matéria de granulometria arei média).
9,80 – 17,40 m	Possível arenito	Material de cor marrom amarelado. Não é muito perceptível a granulometria, mas em geral, a mesma esta variando de areia fina à areia média. Apresenta bandas fina de um material mais escuro (provável presença de argilomienrais).
17,40 – 21,20 m	Possível arenito, região mais fraturada	Material de cor ocre, variando em tons avermelhados até tons laranja. Apresenta granulometria areia fina, nas regiões mais fraturadas apresenta grãos de granulometria areia média. Esta porção se apresenta mais fraturado do que os outros intervalos.
21,20 – 29,90 m	Possível arenito com passagens de ritmito	Material de cor vermelho alaranjada. Apresenta grãos de granulometria areia fina (de maneira geral bem selecionado, apresentando pequenas variações localizadas). É possível verificar pequenas passagens de “bolsões” de cor amarelo claro, com granulometria areia fina a média. Aparentemente possuem bandas de ritmito.
29,90 – 42,00 m	Possível arenito	Material de cor ocre escuro. Apresenta granulometria variando de fina a grossa (a granulometria grossa, se encontra em bandamentos específicos). Presença de muitas bandas verde escura e bege. É possível perceber os mesmos “bolsões” de cor amarela claro
42,00 – 50,50 m	Possível ritmito	Material de cor ocre alaranjada, apresenta muitas intercalações com matérias de cor amarelo claro e marrom. O material de cor clara apresenta granulometria variando de silte/argila até arei média. Já as bandas escuras apresentam granulometria silte/argila.
50,50 – 66,30 m	Possível arenito	Material de cor ocre, variando de laranja até marrom claro. Apresenta grãos de areia fina (de maneira geral bem selecionada). Presença de passagens de estratos com material verde de granulometria silte/argila. Apresenta regiões mais fraturadas onde o material apresenta granulometria areia média. Estratos es
66,30 – 74,00 m	Possível arenito	Zona muito fraturada Material de cor ocre variando em laranja claro. Apresenta granulometria areia fina, apresenta estratos de granulometria mais grossa. O material apresenta muitas discontinuidades, como falhas e planos de acamamento. E presença de camadas de cor verde claro, com granulometria silte/argila. Possível presença de ritmitos.
74,00 – 82,20 m	Possível ritmito	Material de cor alaranjado. Apresenta granulometria areia fina. O material apresenta uma forte estratificação entre matérias de cores diferentes. Presença de camadas de cor verde com granulometria silte/argila e camadas mais claras com material de granulometria variando de areia fina a média. Presença de possíveis camadas de arenito
82,20 – 91,00 m	Possível ritmito	Material de cor alaranjado variando a ocre. Forte presença de intercalação entre matérias de cor alaranjando com camadas de material verde claro/escuro. O material claro é mais abundante, apresenta granulometria silte/argila. Já o material verde claro apresenta granulometria silte/argila enquanto que o verde escuro apresenta granulometria variando de silte/argila até areia fina.
91,00 – 92,9 m	Possível ritmito	Zona muito fraturada. Material de cor alaranjado variando a ocre. Forte presença de intercalação entre matérias de cor alaranjando com camadas de material verde claro/escuro. O material claro é mais abundante, apresenta granulometria silte/argila. Já o material verde claro apresenta granulometria silte/argila enquanto que o verde escuro apresenta granulometria variando de silte/argila até areia fina.
92,9 – 146,80 m	Possível ritmito	Ritmito clássico, apresentando uma forte estratificação. Material de cor ocre variando a laranja (maior parte do material) e bandas de cor verde claro, escuro e amarela claro. A banda de cor ocre, amarela claro e as bandas verde claro, apresenta granulometria silte/argila enquanto que a banda verde-clara apresenta granulometria variando de areia fina até areia média. É possível notar algumas camadas de possível arenito fino.
146,80 – 151,00 m	Possível arenito conglomerático	Esse material apresenta cor marrom, variando até ocre claro. O material predominante é o arenito, que apresenta cor ocre claro, com granulometria areia fina (de maneira geral bem selecionado, apresentando pequenas variações localizadas). Já o conglomerado apresenta a cor marrom e intercalação entre grãos de granulometria variando de areia fina até arei grossa (mal selecionado).

Fonte: Autoria Própria, 2018.

4.3.2 Resistência à Compressão da rocha intacta

Como já previamente mencionado, a estimativa e determinação da resistência à compressão da rocha intacta foi feita a partir de estimativa utilizando curva de correlação a partir da velocidade da onda P. Para a estimativa de resistência à compressão foi utilizada a equação desenvolvida no item 4.1. Amostras de cada trecho do furo foram coletadas para medida de velocidade sônica, fornecendo assim estimativas de resistência à compressão para os dois furos estudados.

A figura abaixo compara as estimativas feitas a partir da velocidade de onda ultrassônica com as medidas calculadas a partir de dados de martelo de Schimidt utilizada no método direto. Embora o coeficiente de correlação não tenha sido muito alto, o resultado foi satisfatório, validando a equação. Além do próprio erro inerente a estimativa, pode-se atribuir a baixa correlação ao fato de a curva de calibração ter sido feita com medidas de prensa, ao contrário das medidas realizadas durante a descrição pelo método direto, com o uso do martelo de Schimidt.

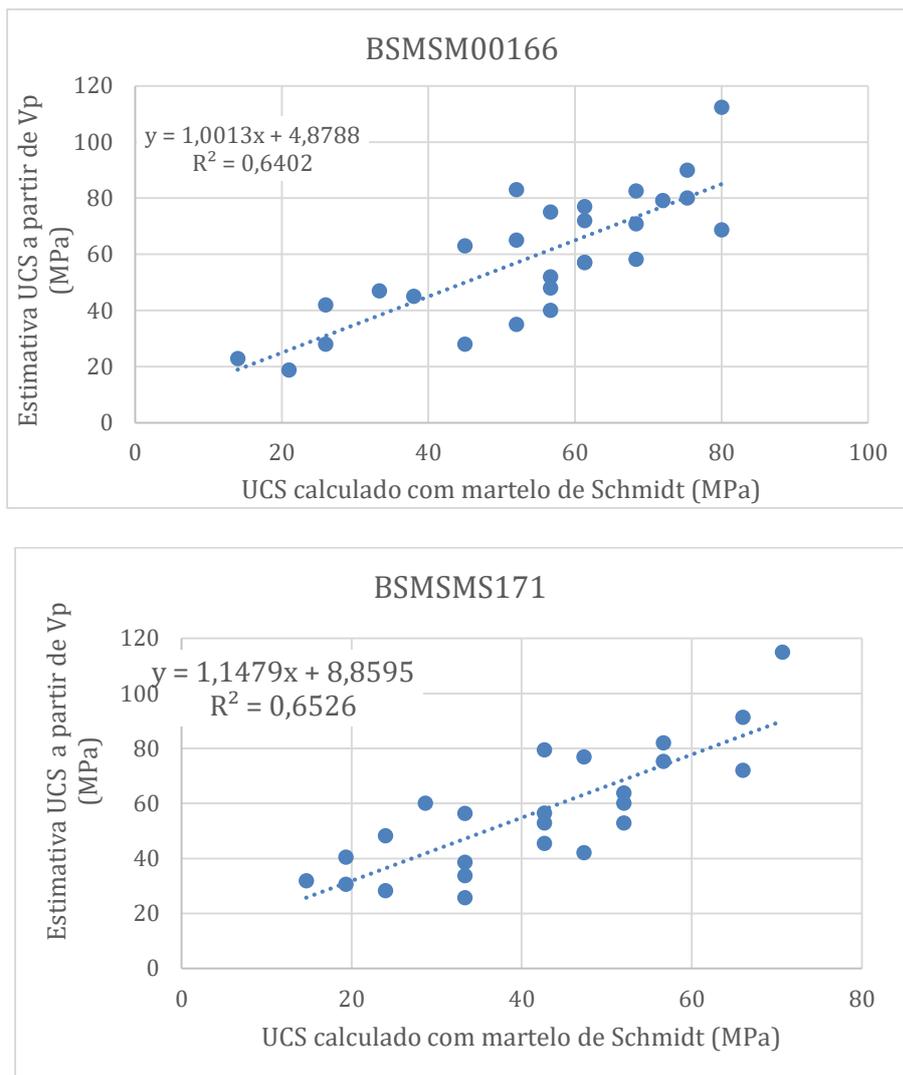


Figura 40: Estimativa de resistência a compressão uniaxial comparada com medidas feitas com martelo de Schmidt para os dois furos estudados.

Fonte: Autoria Própria, 2018.

4.3.3 Descontinuidades

As descontinuidades são mapeadas com relativa facilidade por contrastarem bem com as imagens (Figura 41). Nas Figura 41 e Figura 42 é possível ver as fraturas presentes na imagem e a foto do testemunho ao lado para comparação. Além do seu mapeamento, são atribuídas características como: rugosidade, abertura, preenchimento e alteração, as quais recebem valores de acordo com a Tabela 6.

As descontinuidades da Figura 41 são predominantemente rugosas, tanto por não se adequarem a senoide quanto por sua aparência, recebendo um valor igual a 4 na classificação.

A abertura e o preenchimento, quando presente, são medidos e registrados na forma de uma senoide mais espessa como o auxílio do software *WellCad*®. Na Figura 42 pode ser vista uma zona fraturada e para efeitos de classificação, foi considerada como sendo uma abertura de 20 milímetros e um preenchimento com material duro de 80 milímetros.

A alteração da descontinuidade é feita de forma visual, pela cor, presença de material alterado no contato e pela experiência do analista. Nestas duas figuras as descontinuidades são classificadas como pouco alteradas.

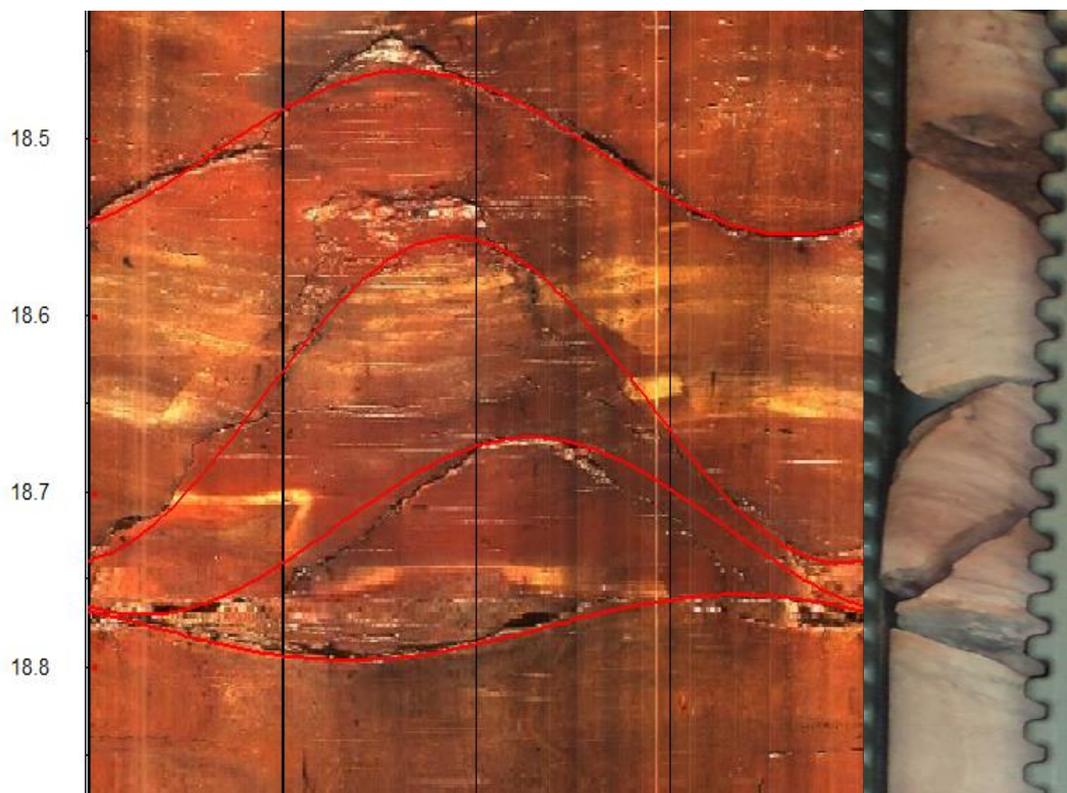


Figura 41: Fraturas mapeadas com o software WellCad.

Fonte: Autoria Própria, 2018.

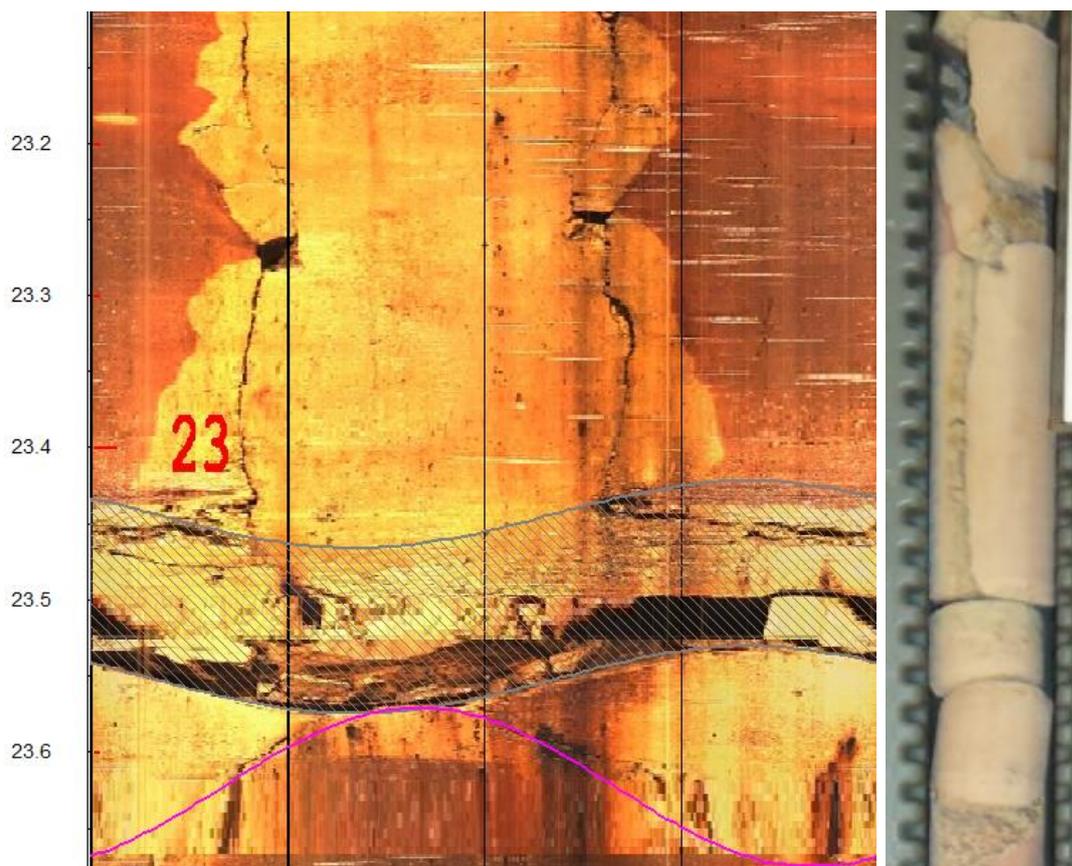


Figura 42: Imagem de OPTV e testemunho. Presença de fratura vertical horizontal e com mergulho.

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Desta forma, a partir das imagens são feitos o mapeamento das fraturas utilizando o software *WellCad*[®], e assim foram atribuídos os diversos parâmetros, para posterior uso na classificação (Tabela 19).

Tabela 19: Descrição das descontinuidades a partir de imagens do OPTV (trecho do furo 166).

Prof. (m)	Tipo de estrutura	Azimute	Mergulho	Espessura/ Abertura	Rugosidade	Abertura	Alteração
6,14	Descontinuidade maior	184,39	16,17	10,45	Polida	Aberta	W1
6,93	Fratura preenchida	169,76	13,22	6,81	Lisa	Fechada	W2
7,62	Fratura parcialmente aberta	49,34	54,37	0	Lisa	Fechada	W2
7,96	Fratura preenchida	41,81	55,03	22,92	Rugosa	Fechada	W2
8,16	Descontinuidade menor	172,96	15,91	1,25	Rugosa	Semi-aberta	W2
8,48	Fratura parcialmente aberta	48,5	61,35	0	Lisa	Fechada	W1
10,24	Fratura preenchida	44,32	56,83	20,52	Rugosa	Fechada	W2
11,24	Acamamento	169,76	14,84	0	Lisa	Fechada	W1
12,26	Acamamento	178,95	14,31	0	Lisa	Fechada	W1
13,61	Acamamento	164,74	17,74	0	Lisa	Fechada	W1
16,46	Acamamento	125,44	14,57	0	Lisa	Fechada	W1
17,01	Descontinuidade menor	1,25	38,66	0	Lisa	Fechada	W1
17,46	Zona fraturada	125,85	13,22	93,94	Rugosa	Aberta	W2
17,93	Descontinuidade maior	20,49	63,89	0	Rugosa	Fechada	W1
18,1	Descontinuidade maior	15,89	41,99	3,72	Rugosa	Semi-aberta	W2

Fonte: Autoria Própria, 2018.

De forma análoga a descrição e classificação dos testemunhos de rocha foram feitos em uma descrição baseada nas imagens. Nessa descrição foram inseridas as informações sobre a litologia e descontinuidades com suas características. Assim como na classificação dos testemunhos, foi montada uma tabela para classificação segundo a classificação geomecânica RMR, onde buscou-se trabalhar com o maior número de parâmetros. Para o valor de persistência da fratura foi atribuídos um valor médio, e o parâmetro “presença de água” foi estimado o valor de 10.

Tabela 20: Composição do valor de RMR para cada trecho registrado no OPTV (segmento do furo 166).

De	Para	UCS	RQD	Espaçamento	Descontinuidades	Água	RMR médio	Classe
0,00	5,70							Classe V
5,70	7,05	5	19	12	12,00	10	58	Classe III
7,05	10,10	4	18	13	15,00	10	60	Classe III
10,10	13,20	4	18	15	20,00	10	67	Classe II
13,20	16,30	5	17	18	22,00	10	72	Classe II
16,30	18,05	5	19	10	17,00	10	61	Classe II
18,05	19,30	4	20	7	20,00	10	61	Classe II
19,30	22,20	6	18	14	19,00	10	67	Classe II
22,20	25,10	5	20	9	16,00	10	60	Classe III
25,10	27,55	4	20	8	15,00	10	57	Classe III
27,55	30,65	3	19	10	19,00	10	61	Classe II
30,65	33,75	4	19	10	16,00	10	59	Classe III

Continuação da Tabela 20								
33,75	36,70	6	20	9	12,00	10	57	Classe III
36,70	39,60	6	19	10	18,00	10	63	Classe II
39,60	42,50	4	19	11	17,00	10	61	Classe II
42,50	45,40	6	17	17	15,00	10	65	Classe II
45,40	48,30	5	18	14	19,00	10	66	Classe II

Fonte: Aatoria Própria, 2018.

4.3.3.1 Dificuldades de identificação e interpretação das imagens

Foi identificado ao longo do trabalho três tipos de situações difíceis que podem acontecer quando se vai interpretar as imagens.

1. Fraturas fechadas que se apresentam como imagens íntegras, estando presentes nos testemunhos de rocha.
2. Descontinuidades parciais ou até mecânicas causadas durante a operação de perfuração, causando dúvidas no mapeamento.
3. Trechos sem resolução adequada devido a problemas na sonda.

Na Figura 43 é possível ver que o testemunho apresenta mais descontinuidade do que era esperado pelo OPTV. O OPTV em muitas situações não apresenta sinais claros das fraturas e muitas delas acabam se revelando com a descompressão da rocha, ou no processo de sondagem a rocha acaba se quebrando no plano de fraqueza.

Há alguns casos o contraste não é muito evidente o que causa dúvidas e torna o mapeamento subjetivo (Figura 44). Nesses casos, vale mais a experiência do analista para poder julgar se deve ser enquadrá-lo ou não como uma descontinuidade, implicando assim na penalização da classificação.

Como as imagens foram registradas com o abaixamento da sonda, por mais que a sonda percorra 100% do furo, há trechos em que ela encontra um pouco de resistência nas paredes, ficando presa momentaneamente e depois descendo com um pouco de velocidade. Nesses dois casos, ocorre a perda do registro do trecho, pois a imagem ficará em um único quadro ou com uma definição demasiada baixa (Figura 45). Para solucionar esse problema a sonda poderia ser abaixada até o final do furo e o registro das imagens serem realizados com a sua subida.

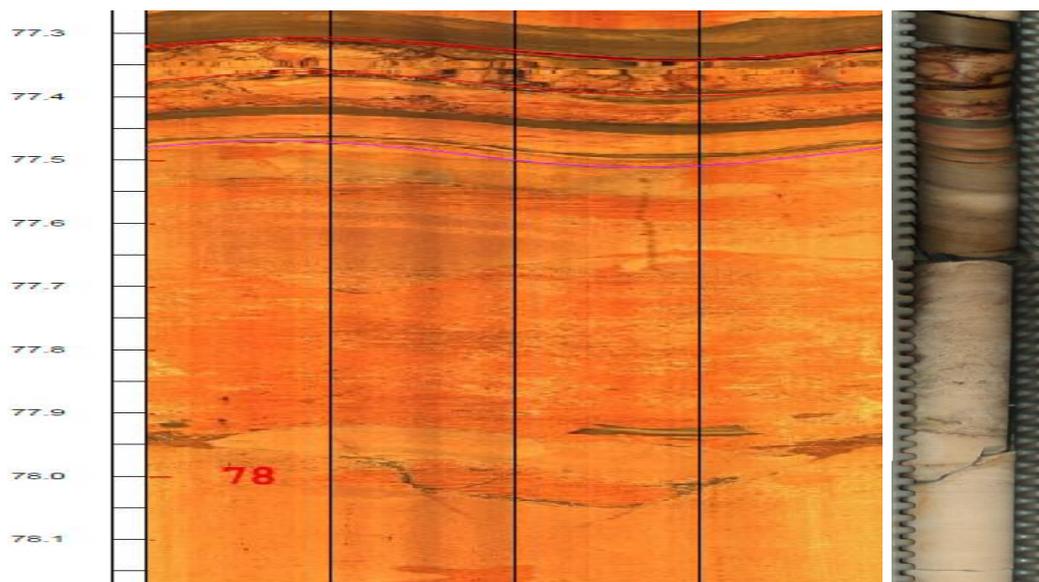


Figura 43: Abertura de descontinuidades decorrentes da sondagem (furo 172).

Fonte: Autoria Própria, 2018.

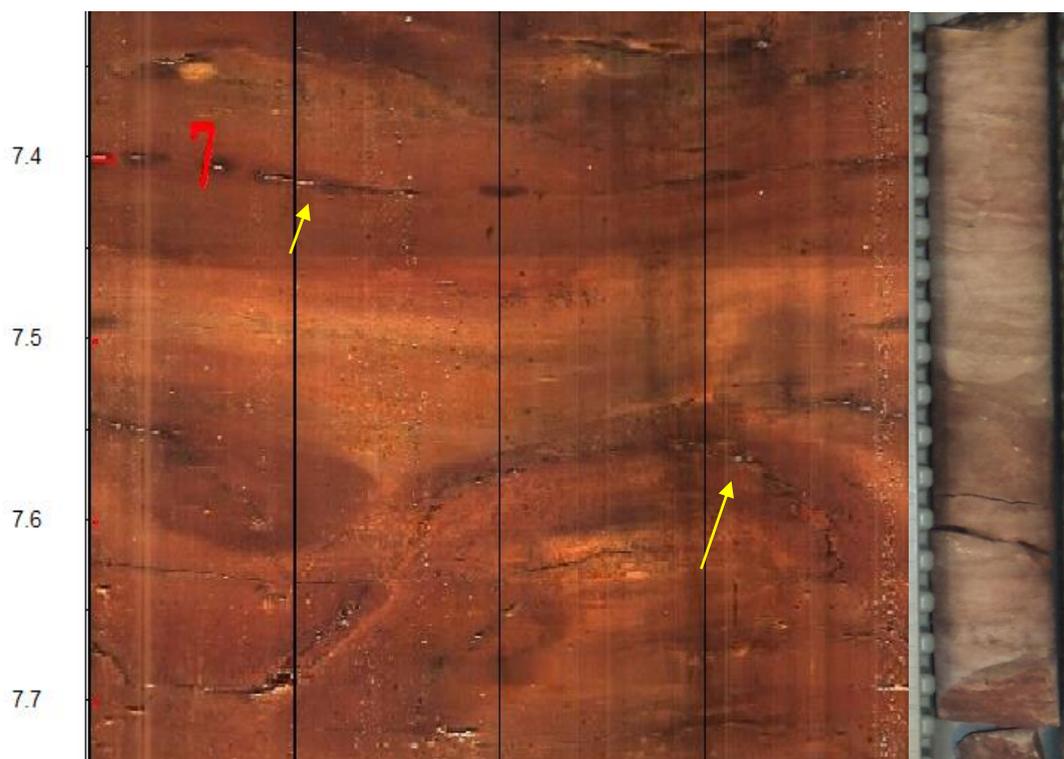


Figura 44: Fraturas de difícil detecção, ou com atribuição subjetiva (Furo 166).

Fonte: Autoria Própria, 2018.

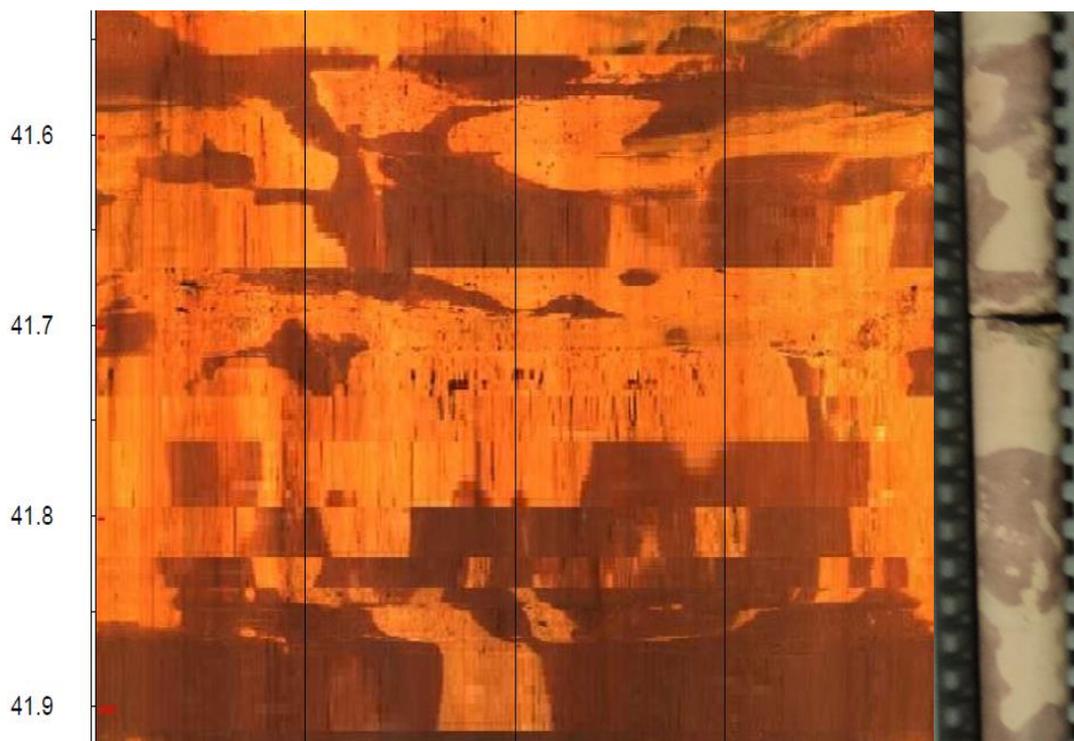


Figura 45: Trecho do furo com problemas de registro devido a travamento da sonda (Furo 166).

Fonte: Autorial Própria, 2018.

4.3.4 Comparação entre os métodos OPTV e Testemunho de Rochas

Como ponto de partida já era esperado que os métodos não apresentem muita variação nos resultados, considerando que a maior parte dos parâmetros na avaliação de testemunhos de rocha e no OPTV é subjetivo e visual. Abaixo é feita uma comparação de cada parâmetro seguidos do resultado final dos trechos analisados.

4.3.4.1 Descrição geológica

A descrição do furo pelos testemunhos de rocha e pelo OPTV se mostraram bastante semelhante para o furo 166 (Tabela 21). Pode-se notar que os resultados da descrição geológica são bastante efetivos na identificação das rochas, tendo uma pequena variação nas zonas de contato litológica, o que é aceitável devido as variações de comprimento e recuperação de um método para o outro.

Tabela 21: Comparação da descrição feita por imagem e por testemunhos furo 166

Descrição televisionamento		Descrição testemunhos	
Zona	Litologia	Zona	Litologia
0 - 5,70 m	Sem leitura OPTV	0 - 1,80m	solo
5,70 – 15,90 m	Possível arenito	1,80 - 43,0 m	arenito
15,90 – 16,30 m	Possível arenito		
16,30 – 18,90	Possível arenito		
18,90 – 41,50 m	Possível arenito		
41,50 – 43,5 m	Transição arenito - ritmito		
43,50 – 54,6 m	Possível ritmito	43,0 - 53,0m	ritmito
54,6 – 59,1 m	Possível arenito	53,0 - 58,95m	arenito
59,10 – 61,50 m	Possível arenito	58,95 - 60,30m	arenito
61,50 – 90,00 m	Possível arenito	6,30 - 91,80m	arenito
90,00 – 103,40 m	Possível ritmito	91,80 - 102,45m	ritmito
103,4 – 137,10 m	Possível ritmito	102,45 - 136,05m	ritmito
137,10 – 151,5 m	Possível arenito conglomerático	136,05 - 198,35m	arenito

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Porém o mesmo não aconteceu de forma tão satisfatória para o furo 172 (Tabela 22). Isso se deve ao fato de a imagem não estar com uma resolução tão boa quanto a do furo 166 e devido as cores serem diferentes do que vistos nos testemunhos de rocha.

Tabela 22: Comparação da descrição feita por imagem e por testemunhos furo 172

Descrição televisionamento		Descrição testemunho	
Zona	Litologia	Zona	Litologia
0 - 4,4	Sem leitura OPTV	0-0,75	Solo residual
4,4 - 21,2	Possível arenito	0,75-42	Arenito
21,2-29,9	Possível arenito com passagens de ritmito		
29,9 - 42,0	Possível arenito		
42,0 - 50,5	Possível ritmito	42-53	Arenito
50,5-74,0	Possível arenito	53-74,5	Ritmito
74,0-146,8	Possível ritmito	74,5-148,1	Ritmito
146,8-151	Possível conglomerado	148,1-152,75	Conglomerado

Fonte: Autoria Própria, 2018.

4.3.4.2 Parâmetros RMR

Nas Figura 45 e Figura 46 está o comparativo para os parâmetros que compõem a classificação RMR para os dois furos analisados na dissertação.

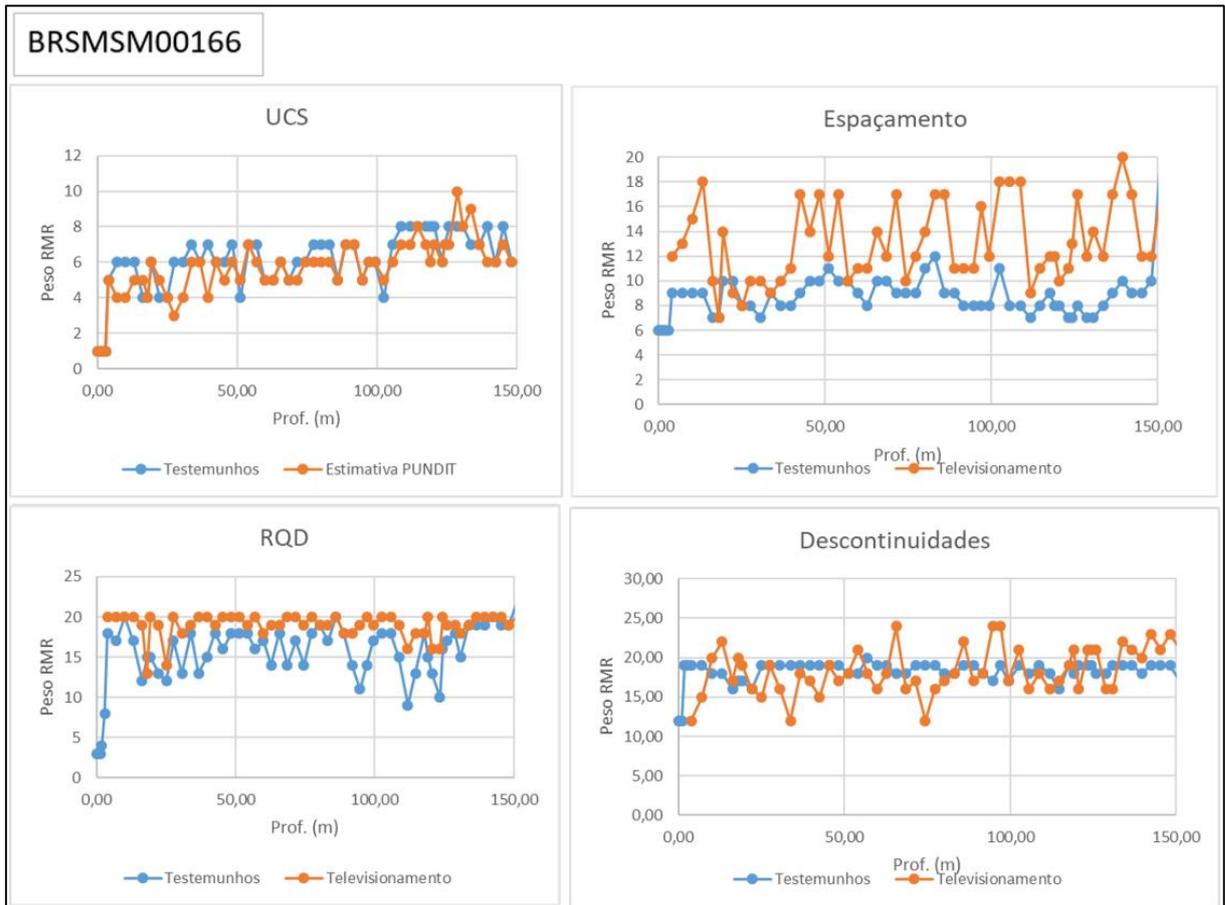


Figura 46: Comparativo de parâmetros componentes do RMR para o furo 166

Fonte: Autoria Própria, 2018.

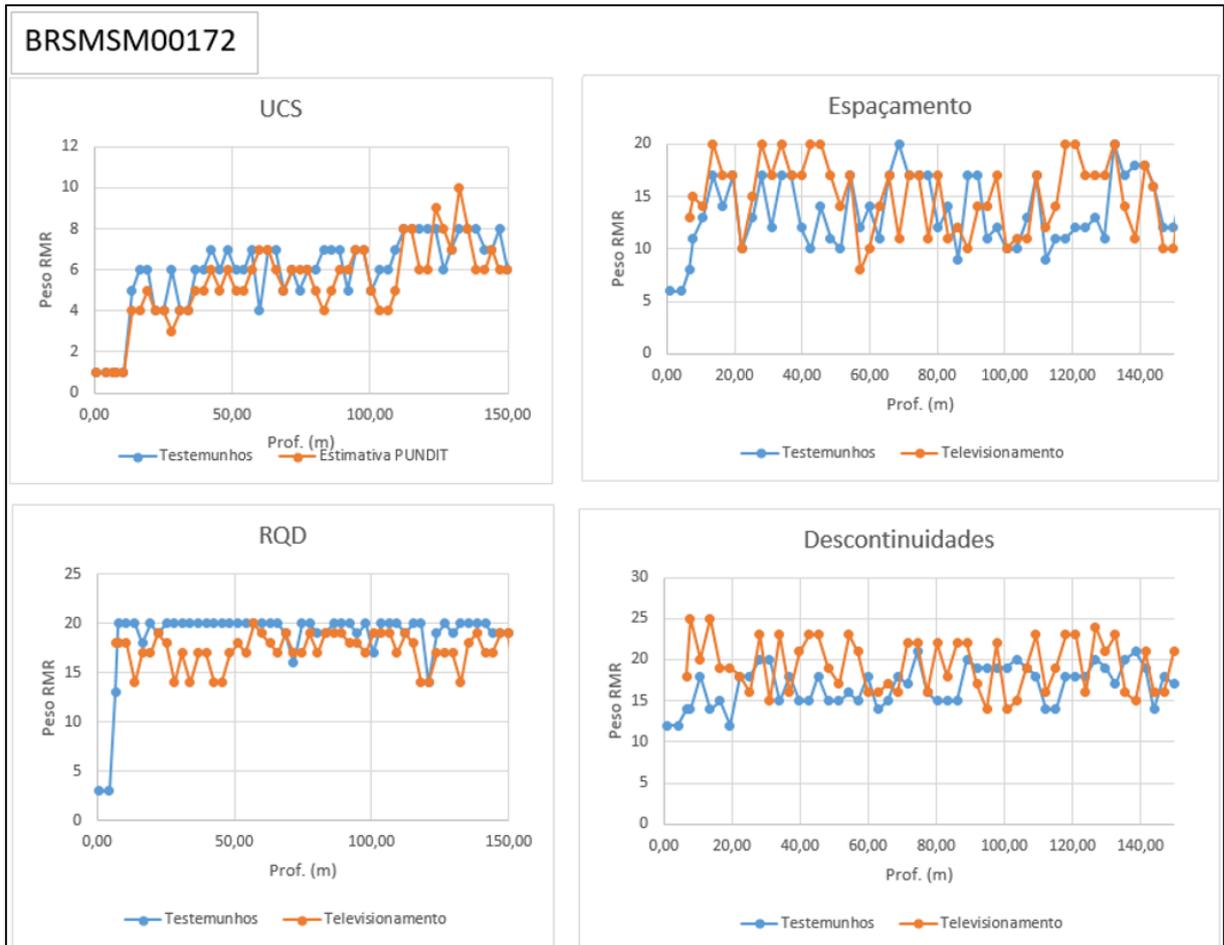


Figura 47: Comparativo dos parâmetros componentes do RMR para o furo 172.

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Dentre os parâmetros, pode-se perceber que tanto o parâmetro Resistência à compressão (UCS) e o parâmetro “Descontinuidades” não apresentam grandes variações. Para a Resistência à compressão o seu valor ficou semelhante nos dois métodos. E para o parâmetro descontinuidades, estas também não apresentaram muita variação para o furo 166, isso porque as características das descontinuidades podem ser percebidas de forma clara nos testemunhos e no OPTV, resultando num valor médio semelhante, com diferença de 2%. A única diferença está no fato de que na imagem é possível ver abertura, tornando a classificação mais fiel quanto a esse parâmetro.

Porém, no furo 172 houve uma melhor classificação do parâmetro “descontinuidades” no OPTV, isso se deve ao fato de apresentar muitos trechos sem fraturas. A Figura 47 mostra um trecho onde nos testemunhos há presença de diversas fraturas, e rugosidades de

classificação baixa, sendo penalizado em relação a imagem, que não apresenta fratura alguma, assim recebendo um valor alto na avaliação dessas características.

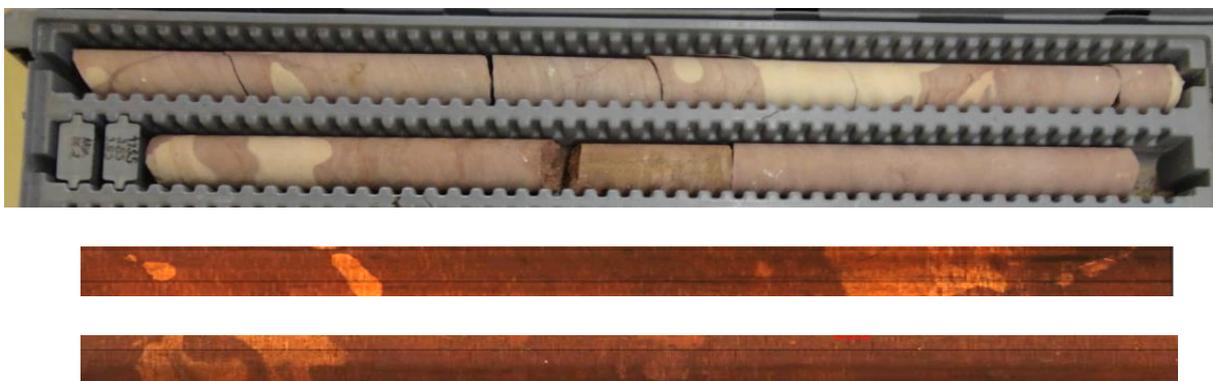


Figura 48: Trecho do furo 172 (testemunhos acima e imagens do mesmo segmento do OPTV abaixo) mostrando diferenças na presença de descontinuidades.

Fonte: Autoria Própria, 2018.

O parâmetro “Espaçamento” apresenta classificações com maior qualidade para o televisionamento. No OPTV as imagens apresentam fraturas fechadas que não foram percebidas (por estarem fechadas), já nos testemunhos de rocha há o aparecimento dessas fraturas ou ainda fraturas mecânicas do processo de sondagem que acabam sendo erroneamente consideradas fraturas das rochas. Essa característica inerente aos métodos geralmente influencia para uma penalização do parâmetro no método direto.

O parâmetro “RQD” ocorre de maneira distinta na comparação. Pois esperava-se um resultado alto na avaliação das imagens do OPTV e um valor mais baixo na classificação dos testemunhos. Embora um dos furos tenha seguido o padrão esperado (Furo 166), o furo 172 não segue a mesma lógica. A diferença nos resultados é inesperada, por não seguir um mesmo padrão.

Há duas explicações para as diferenças encontradas. A primeira tem a ver com a qualidade do maciço analisado para os dois furos (Tabela 23), onde pode ser visto que o número de descontinuidades detectadas nos testemunhos apresenta uma variação significativa.

Tabela 23: Comparação do número de descontinuidades entre os furos analisados

ID do Furo	Nº descontinuidades testemunhos	Nº descontinuidades OTV
BSMSM166	516	199
BSMSM172	182	141

Outro ponto está na forma de contabilização do RQD, pois são diferentes. Nos testemunhos são contabilizados os trechos maiores de 10cm, enquanto que nas imagens do televisionamento, foi feito um cálculo de estimativa baseado no espaçamento de cada trecho, utilizando o RQD teórico, sugerido por Oliveira (2015).

Essas diferenças, principalmente de resultados de RQD teórico trouxeram dúvidas sobre a qualidade dos resultados fornecidos pelo cálculo de Priest & Hudson (1976). Pois este não estava representando de forma satisfatória a realidade do maciço. Como alternativa para avaliação do RQD das imagens, Dantas *et al* (2018) sugerem que a avaliação do RQD seja feita de forma análoga a realizada nos testemunhos. Assim, optou-se por medir o RQD diretamente pelas imagens do furo, onde buscou-se analisar as imagens de forma mais minuciosa para contabilizar trechos maiores que 10cm.

Por fim, o parâmetro “Presença de água” foi estimada com o valor de 10, pelo conhecimento hidrogeológico da região. Como foi estimado para os dois métodos, não cabe comparação.

4.3.4.3 Reclassificação considerando RQD avaliado por imagens do televisionamento

Considerando que a classificação proposta na metodologia inicial não foi satisfatória para o parâmetro RQD. Foi feita uma nova classificação, na qual o RQD foi avaliado de forma similar ao feito em testemunhos, o qual segundo Dantas *et al* (2018) apresenta uma correlação melhor do que o RQD teórico.

A nova classificação pode ser vista abaixo, bem como a comparação com os resultados obtidos na avaliação de testemunhos.

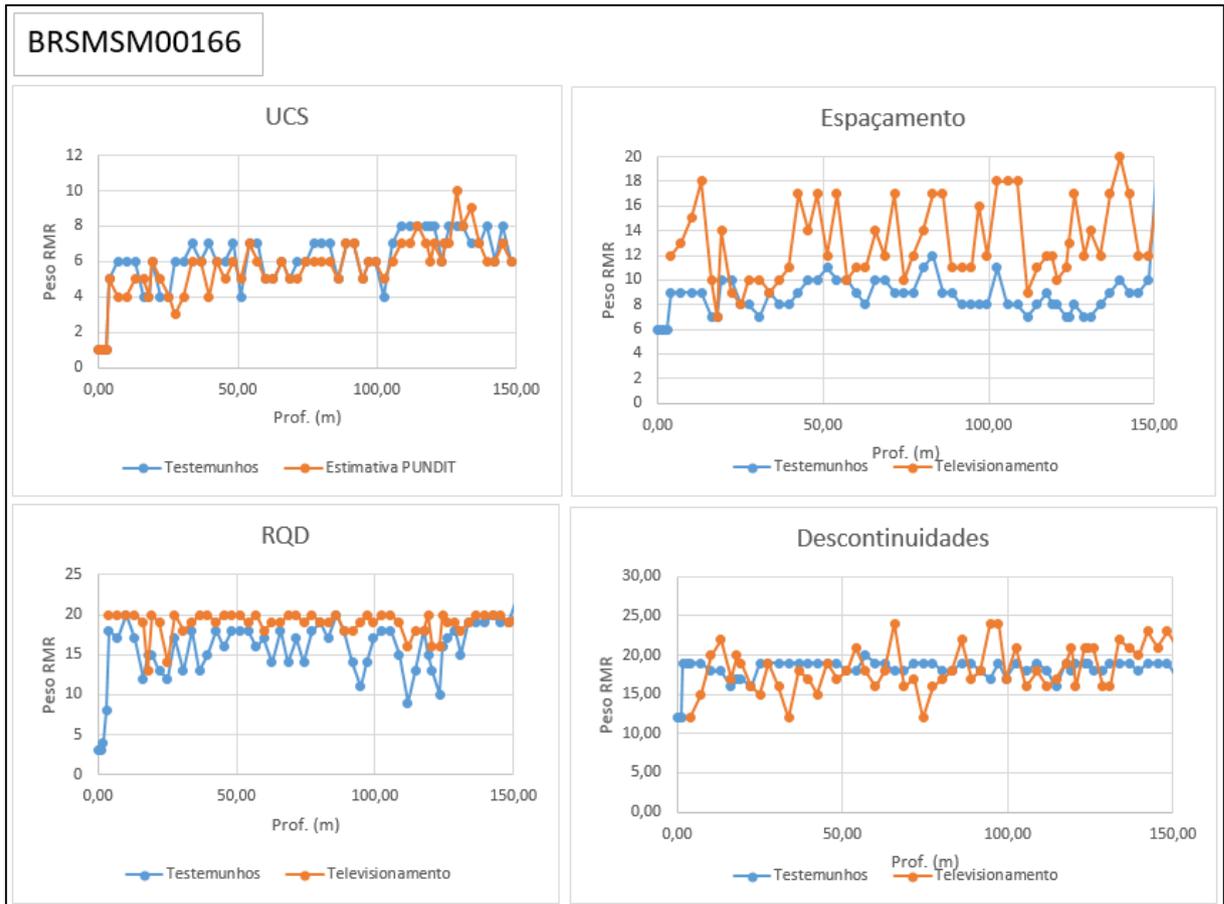


Figura 49: Comparativo dos parâmetros analisados pelos testemunhos e pelo imageamento óptico do furo 166.

Fonte: autoria própria, 2018

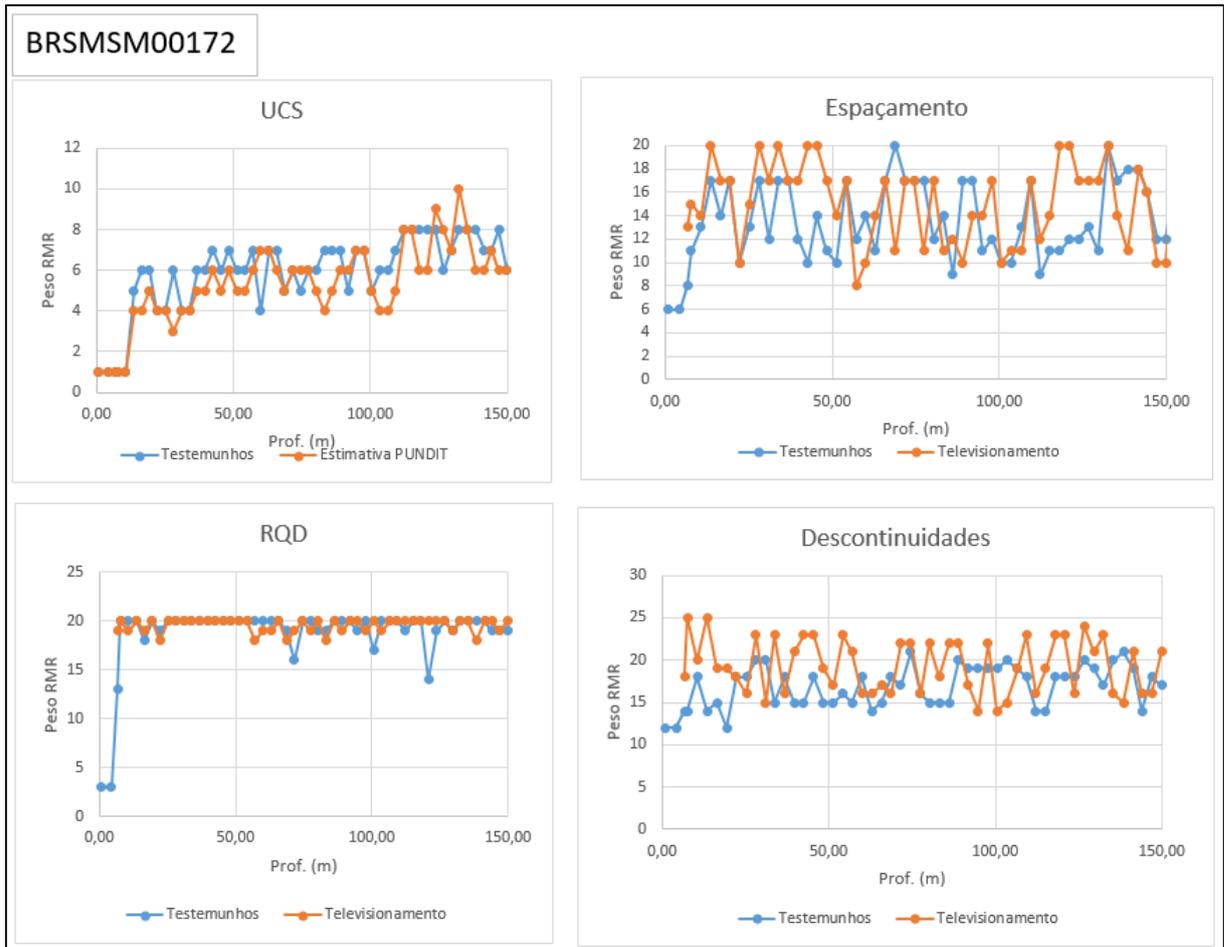


Figura 50: Comparativo dos parâmetros analisados pelos testemunhos e pelo imageamento óptico do furo 172.

Fonte: autoria própria, 2018

Os novos resultados para o RQD analisados nas imagens estão dentro do esperado, um pouco acima dos valores registrados na avaliação dos testemunhos, além disso, apresentaram padrões de qualidade semelhantes aos resultados obtidos na avaliação de testemunhos.

Na figura a seguir está um comparativo do RMR obtido por análise dos testemunhos de rocha e pelo OPTV:

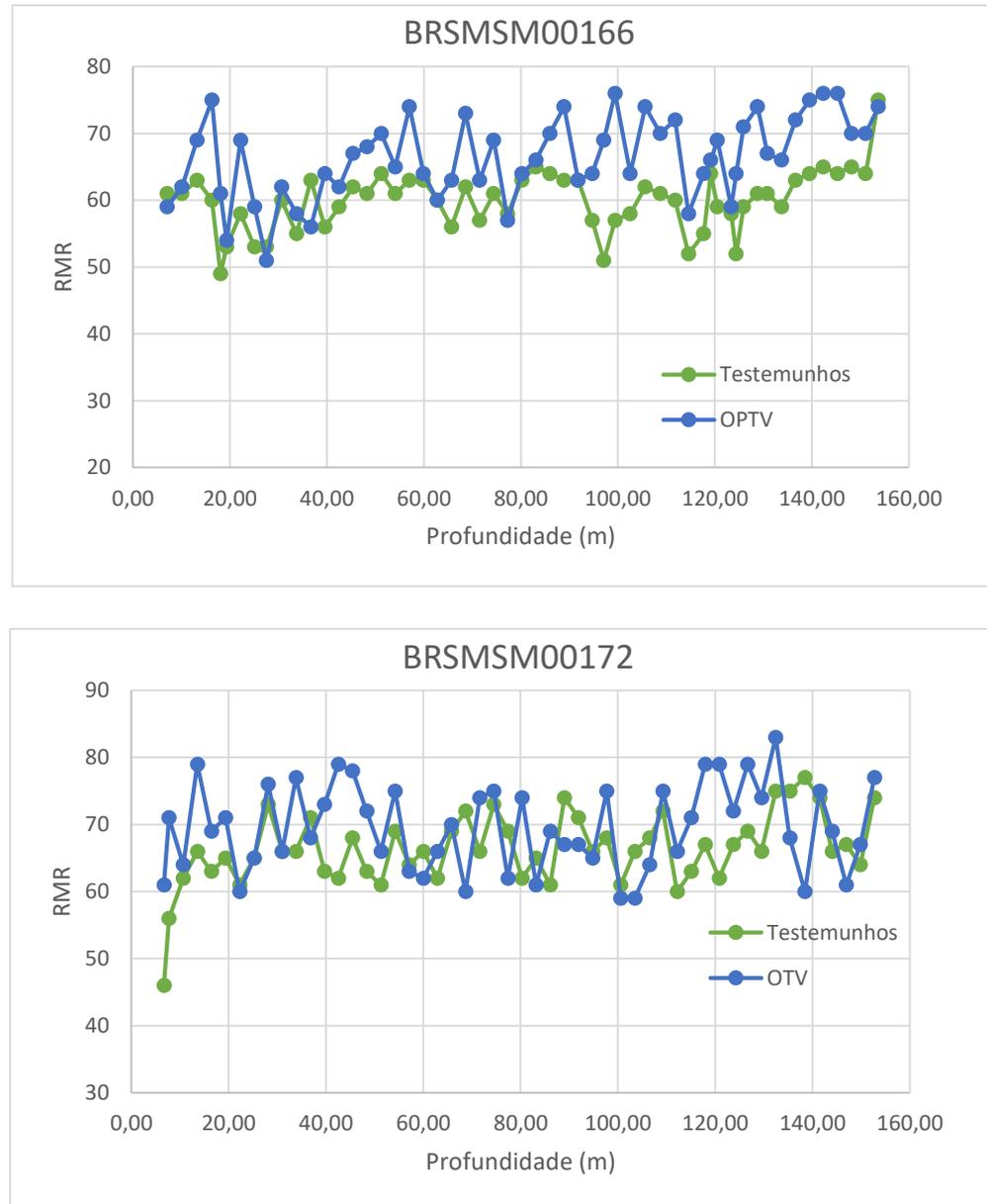


Figura 51: Comparação entre a classificação Geomecânica RMR dos testemunhos de rocha e o OPTV.

Fonte: Autoria Própria, 2018.

Os resultados obtidos se mostraram bastante similares, podendo-se observar um leve aumento do RMR obtido na classificação das imagens em comparação com o obtido a partir dos testemunhos:

O resultado é esperado tendo em vista que as imagens mostram o maciço rochoso com o mínimo de interferência, já os testemunhos sofrem quebras mecânicas e o aparecimento de fraturas fechadas ou de descompressão, o que acaba penalizando o valor do maciço rochoso. Os resultados se mostram bastante próximos.

Tabela 24. Média da Classificação geomecânica entre os furos analisados.

	RMR OTV	RMR testemunhos	Diferença
Média furo 166	66,38	59,93	6,45
Média furo 172	69,56	66,29	3,27

Fonte: Autoria Própria, 2018.

4.4 AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA UTILIZADA PARA CLASSIFICAÇÃO NA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação buscou classificar o maciço somente com métodos indiretos, para isso todos os parâmetros foram obtidos com o uso de imagens e velocidade de onda ultrassônica. Ao avaliar o resultado, visualmente é possível perceber na Figura 51 que a classificação obtida ao longo do furo segue o mesmo padrão pelos dois métodos, mostrando que a classificação está coerente com o esperado.

A única modificação feita na metodologia foi em relação a classificação RQD para as imagens do televisionamento óptico, o qual foi inicialmente calculado como RQD teórico (PRIEST & HUDSON, 1976), porém, devido ao seu resultado não acompanhar o RQD tradicional, foi decidido utilizar a técnica de RQD_{OPTV} , a qual expressou melhor as condições do furo.

Embora o furo tenha sido classificado com sucesso pelo método indireto, é necessário considerar que o valor obtido é maior que o da classificação tradicional, necessitando assim, um fator de correção para que o seu valor represente a real qualidade do maciço rochoso.

Buscando uma maior aderência entre as classificações, foi calculado um fator de penalização que implicasse na menor variância entre os resultados das classificações. Para o maciço estudado, foi obtido um fator de penalização igual a 0,92. O resultado da classificação multiplicada pelo fator de correção pode ser visto na figura a seguir:

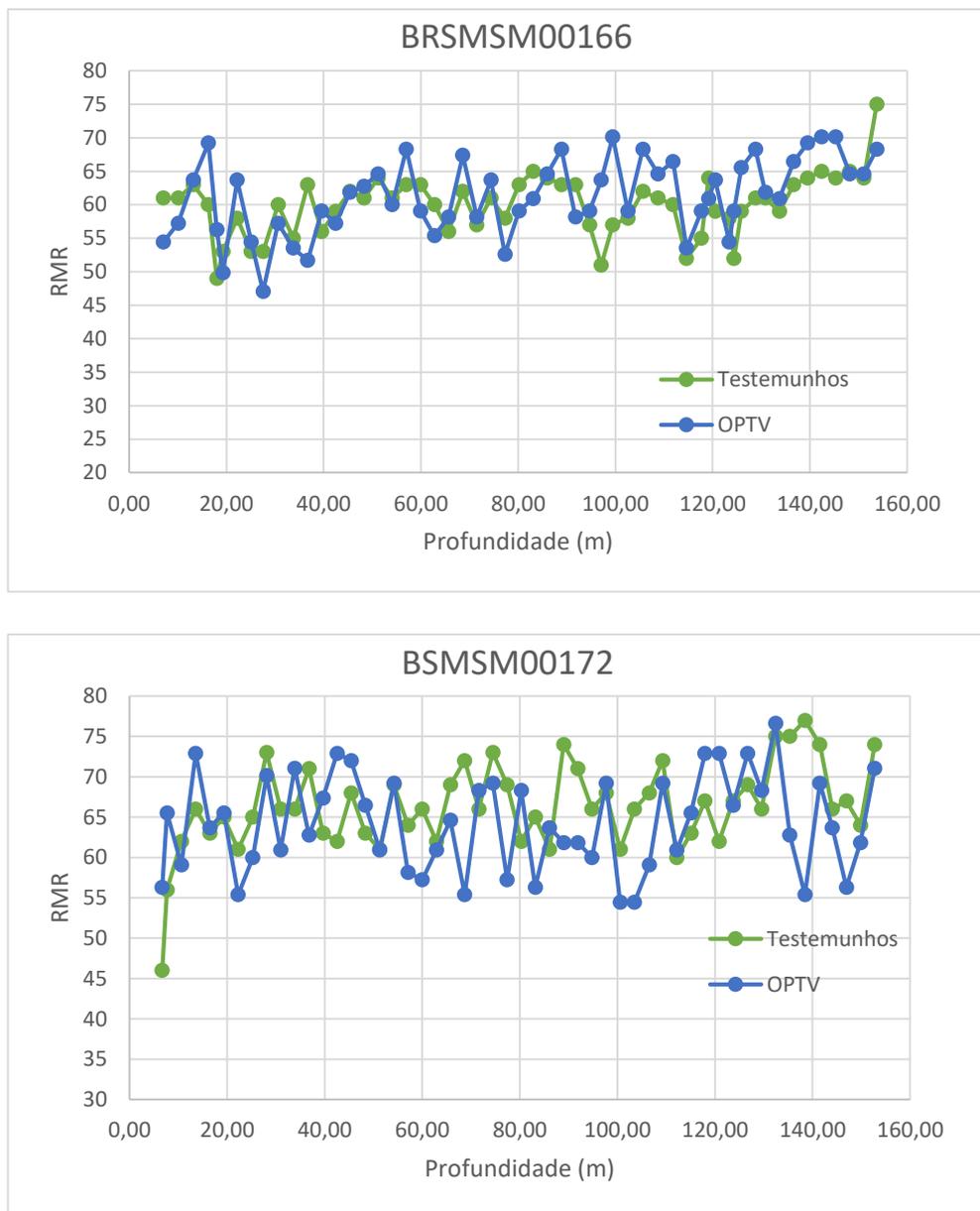


Figura 52: Comparação entre os resultados RMR com a penalização do método indireto por fator de correção

Fonte: Autoria Própria, 2018.

4.5 PRINCIPAIS DIFERENÇAS NA COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

A descrição geológica a partir de imagens de OPTV, pode ser discutível, uma vez que somente com os dados de imagem o avaliador terá de tirar constatações a partir de cores e brilhos que não serão as reais, estratificações e contorno de grãos sem muita definição, o que comparado com a avaliação de testemunho físico, certamente terá prejuízo. No testemunho físico a identificação a rocha é mais exata, com fácil identificação de cor, brilho, dureza,

tamanho de grãos, etc. Porém, é um tipo de avaliação que com a prática e conhecimento da geologia local podem ser utilizadas de forma complementar em furos destrutivos.

Para a classificação quanto a alteração foi fundamental que houvesse o conhecimento dos testemunhos de sondagem da região, pois somente com a imagem do furo a avaliação fica comprometida devido à subjetividade do analista. Frederick *et al* (2002) inclusive afirma que a qualidade da rocha só pode ser estimada mediante uma calibração prévia utilizando-se geotécnica local.

Ao contrário do método de sondagem que pode ter perda de material e baixa recuperação, a recuperação de informações pelo OPTV é sempre próxima a 100%, sendo as perdas decorrentes de problemas técnicos como travamento da sonda ou baixa resolução, ambos de fácil solução.

Uma dificuldade encontrada foi fazer a ponderação por trecho de sondagem, pois havia situações diversas onde em um mesmo trecho estavam presentes fraturas fechadas, abertas, lisas, rugosas e com preenchimento. O que impactava em um trecho de qualidade heterogênea, mas sempre se buscou um valor médio que representasse adequadamente a classificação de cada parâmetro.

5 CONCLUSÃO

Os métodos indiretos utilizados conseguiram medir ou estimar os principais parâmetros que compõem a classificação RMR de forma satisfatória. O televisionamento óptico foi utilizado para identificação litológica, presença de fraturas e suas características. Para a estimativa da resistência a compressão uniaxial, foi utilizado equipamento medidor de ondas ultrassônicas. Por consequência, a comparação dos resultados obtido por estes métodos indiretos apresentaram resultados similares a classificação feita pelo método direto, com pequenas diferenças devido a particularidades de cada método.

Para a estimativa da resistência à compressão uniaxial das rochas, o uso velocidade de onda compressional ultrassônica apresentou coeficiente de correlação de 0,75 para os arenitos e 0,68 para o conjunto de rochas que compõem o maciço rochoso. Ademais, foi constatado que quanto mais específico for o conjunto de rochas analisados, melhor será a correlação estimada pelo método sônico.

A classificação geomecânica RMR apresentou valores com um aumento de 5 a 11% para as medidas realizadas com equipamentos geofísicos em comparação a classificação por testemunhos de sondagem. Os parâmetros apresentaram em sua maior parte resultados similares para os dois métodos. No entanto, como as imagens obtidas pelo televisionamento óptico tendem a apresentar menor quantidade de descontinuidades, os parâmetros RQD e espaçamento entre fraturas apresentaram as maiores diferenças. Tal diferença deve ser considerada para a utilização da classificação, assim como a necessidade de se aplicar um fator de correção a fim de obter um resultado coerente com a classificação tradicional.

Por fim, os métodos geofísicos empregados se mostraram eficientes na classificação do maciço rochoso. O método proporciona um ganho de tempo e custo, porém necessita de calibração e avaliação de profissional qualificado para uma correta quantificação e processamento dos parâmetros e correlações.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

5.1.1 Estudos *in situ* e combinação de perfilhadores

A fim de complementar o estudo, sugere-se que seja feita a classificação RMR somente com medições *in situ* utilizando sondas geofísicas: perfilhadores ópticos, acústico e sônico. Além de se elaborar uma curva de correlação com o perfil sônico, que era a ideia inicial deste trabalho.

O uso do Perfil Acústico (*Acoustic televiewer*), contribuiria para complementar as informações obtidas pelo perfil de televisionamento óptico. O perfil acústico consegue identificar descontinuidades assim com o OPTV, porém tem a vantagem de conseguir trabalhar em águas turvas devido ao princípio do método. Além disso, o método consegue identificar variações de diâmetro e integridade do furo.

Além disso, seria pertinente avaliar a classificação em furos destrutivos, pois o emprego nestes traria maior agilidade aos trabalhos de sondagem.

5.1.2 Impedância acústica na estimativa de resistência a compressão uniaxial

Com relação a estimativas de resistência a compressão uniaxial, o perfil acústico apresenta uma propriedade com potencial de uso neste campo – medida de impedância acústica.

A impedância acústica é obtida como uma relação direta da amplitude da onda do *Acoustic Televiewer* - ATV que é refletida na parede do furo. Como a intensidade desse sinal tem relação com os módulos elásticos, essa intensidade pode ser correlacionada empiricamente com a resistência da rocha. Frederick et al (2014) fez uma correlação para calcular a resistência estimada, mas para efeitos práticos ele classificou a resistência de acordo com o índice Quality Strength Index (QSI) que varia de 1-5, o que gera um valor global para cada trecho de rocha analisado.

5.1.3 Análise cinemática

Perfiladores acústicos e de televisionamento apresentam imagens do furo que são orientadas com o campo magnético da terra. Dessa forma, esses dados trazem informações das principais famílias de fraturas. Tais dados podem ser utilizados para geração de modelos contendo orientação das descontinuidades e análises cinemáticas.

Estudos de cinemática a partir de imagens obtidas *in situ* contribuiriam de forma significativa na elaboração de design de bancadas, aumentando a confiança e segurança dos parâmetros adotados no dia a dia de uma mina.

6. REFERÊNCIAS

- BAILLOT, R. T., et al.** *Comparing 360° televising of drill holes walls with core logging*. ISC II - In Situ Investigation Conference. Porto, Portugal. 2002
- BARTON, N.** *Predicting the behavior of underground openings in rock*. 4th Manual Rocha Memorial Lecture, Lisbon. NGI Publication, 1987
- BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J.** *Engineering classification of rock masses for the design of rock support*. Rock Mechanics 6, pp. 189-236. 1974
- BIENIAWSKI, Z. T.** *Rock mass classifications in rock engineering. Exploration for Rock Engineering* (ed. Z. T. Bieniawski), 1: 97–106. A. A. Balkema: Cape Town. 1976
- BIENIAWSKI, Z. T.** *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley: New York. 1989
- BRADY, B.H.G., BROWN, E.T.** *Rock mechanics for underground mining*. 3. Ed. Editora: Kluwer Academic Publishers, 2006 646p.
- BRONWN, M., LLEWELYN, K.,** 2017. Comparing Traditional And Televiewer Methods Of Structural Data Collection. Rock engineering and slope stability magazine N°54
- BUTEL, N., HOSSACK, A., KIZIL, M.S.** *Prediction of in situ rock strength using sonic velocity*. 14th Coal Operators' Conference; 89-102. 2014
- CORSTANJE, R., KEM, C, P.,..** *Acoustic Borehole Televiewer - Raising the Bar in Geotechnical Site Investigation*. Malaysia, 2009
- DANTAS, J. G. M. ; SAMPAIO, I. A. ; FREITAS, N. B. A. ; ZINGANO, A. C. .** *Correlação Entre Rqd Testemunho E O Rqd Virtual Optv*. In: 9° Congresso Brasileiro de Minas a Céu Aberto e Minas Subterrâneas, 2018, Belo Horizonte. 9° Congresso Brasileiro de Minas a Céu Aberto e Minas Subterrâneas, 2018.
- DEERE, D. U.** *Geological considerations. Rock Mechanics in Engineering Practice* (eds K. G. Stagg and O. C. Zienkiewicz), 1–20. Wiley: London, 1968
- DEERE, D. U.** *Technical description of rock cores for engineering purposes*. *Rock Mech. Rock Engng*, 1(1): 17–22. 1964
- DEERE, D.U. AND DEERE, D.W.** *The rock quality designation (RQD) index in practice*. In *Rock classification systems for engineering purposes*, ed. L. Kirkaldie, ASTM Special, 1988
- DELTOMBE, J. L., SCHEPERS, R.** *New developments in realtime processing of full waveform acoustic televiewer data*, *Journal of Applied Geophysics* 55, 161-172. 2004
- DEMPERS, G. D., SEYMOUR, C. R. W., HARRIS, M. B. .** *Optimising geotechnical logging to accurately represent the geotechnical environment*, In P. Hagan and S. Sayadam (eds.), *Proceedings of the Second Australasian Ground Control Conferenza*, Sydney, New South Wales, Australia, 23-24 November, pp. 85-94. Melbourne, Victoria, Australia: The AusIMM, 2010

EDLMANN, K., SOMERVILLE, J. M., SMART, B. G. D., HAMILTON, S. A., CRAWFORD, B. R. *Predicting Rock Mechanical Properties from Wireline Porosities*. Paper presented at the SPE/ISRM Eurock '98 held in Trondheim, Norway, 8–10 July 1998, SPE 47344.

ERSOY, H., KANIK, D. *Multicriteria decision-making analysis based methodology for predicting carbonate rocks' uniaxial compressive strength*. Earth Sci. Res. SJ. Vol 16, No. 1; 65-74, 2012.

FREDRICK, F., NGUYEN, T., SEYMOUR, C., DEMPERS, G. *Geotechnical data from optical and acoustic televiewer surveys* [online]. AusIMM Bulletin, No. 5, Oct 2014: 62, 64-66

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 de pundit*, p. 399-410. In: 18º Simpósio de Mineração, São Paulo, 2017

GOKCEOGLU C., ZORLU K., *A fuzzy model to predict the unconfined compressive strength and modulus of elasticity of a problematic rock*. Eng Appl Artif Intell 17:61–72. 2004

GWYNN, X.P., BROWN, M. C., MOHR, P. J., ‘*Combined use of traditional core logging and televiewer imaging for practical geotechnical data collection*’, in PM Dight (ed.), Proceedings of the 2013 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2013 pp. 261-272.

HOEK, E. *Practical rock engineering*:. Online ed. Rocscience. 237 p. Versão Online. 2007

HOEK, E. *Strength of rock and rock masses*. ISRM News J., 2(2): 4–16. 1994

HOEK, E., BROWN, E. T. (1980) *Underground Excavations in Rock*. Instn Min. Metall.: London.

HOEK, E., KAISER, P. K., BAWDEN, W. F. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. A. A. Balkema: Rotterdam. 1995

HOFFMAN, G. L., JORDAN, G. R., WALLIS, G. R. *Geophysical Borehole Logging Handbook For Coal Exploration* Edmonton, Canada: The Coal Mining Research Centre, 1981. 270p

HUDSON, J.A., HARRISON, J.P. *Engineering rock mechanics, An Introduction to the Principles*, 1st ed. Pergamon. 1997

INOUE, M., OHOMI, M. *Relation between Uniaxial Compressive Strength and Elastic Wave Velocity of soft rock*. Proceedings of the International Symposium on Weak Rock, Tokyo; 9–13. 1981

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS COMMISSION ON STANDARDIZATION OF LABORATORY AND FIELD TESTS. *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 15(6): 319–68. Reprinted in Rock Characterization, Testing and Monitoring – ISRM Suggested Methods, 1981 (ed. E. T. Brown), 3–52. Pergamon: Oxford, 1978.

KEAREY, P., BROOKS, M. HILL, I. *An Introduction to Geophysical Exploration*, 3rd ed. Oxford: Blackwell, 2002. 262p.

KENDORSKI, F., R. CUMMINGS, R. A., BIENIAWSKI, Z. T., SKINNER, E. H. *Rock Mass Classification for Block Caving Mine Drift Support*. Proc. 5th Int. Congr. Rock Mech., ISRM, Melbourne, pp. B51-B63, 1983

KEYS, W. S., *Borehole geophysics applied to ground-water investigations* U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations book 2, ch. E-2, 1990

LAUBSCHER, H. P. *Fold development in the Jura*. *Thecnophysics*, 37, 337-362, 1977

LI, S. J., FENG, X.-T., LI, Z., ZHANG, C., CHEN, B. *ISRM Suggested Method for Rock Fractures Observations Using a Borehole Digital Optical Televiewer*, *Rock Mech. Rock Eng. Min. Sci.*, 46 (3), 635-644, 2013

LIMA, P. H. A., SOARES, J. A., ALMEIDA, L. R. B. *Correlação Entre a Resistência à Compressão Uniaxial e Propriedades Elastodinâmicas de Rochas Sedimentares de Diferentes Formações Estadunidenses*. Sociedade Brasileira de Geofísica. 2016

MARQUES, E. A. G.; AZEVEDO, I. C. D. *Introdução à Mecânica das Rochas*. 2a. ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. v. 1. 361p.

MCNALLY, GH. *Estimation of coal measures rock strength using sonic and neutron logs*. *Geoexploration*. 381–395. 1987

MILITZER, H., STOLL, R. *Einige Beitrageder geophysics zur primadatenerfassung im Bergbau*, *Neue Bergbautechnik*. Lipzig 3, 21–25. 1973

MOOS D, ZOBACK MD, BAILEY L. *Feasibility Study of the Stability of Openhole Multilaterals*, Cook Inlet, Alaska. 999 SPE Mid-Continent Operations Symposium held in Oklahoma City, Oklahoma, 28–31 March 1999, SPE 52186.

NGI. *Engineering Geological Logging of Drill Cores*. Oslo, 1998.

OLIVEIRA, D. G. G. de. *Televisionamento óptico de sondagens – proposta metodológica para execução e suas aplicações em obras subterrâneas*. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. 187p

OYLER, D C, MARK, C, MOLINDA, G. *Correlation of sonic travel time to the uniaxial compressive strength of U.S. coal measure rocks*, *Proceedings of the 27th International Ground Control in Mining Conference*, Morgantown, WV. 2008. pp 338–346.

PRIEST, S. D., HUDSON, J. A. *Discontinuity spacings in rock*. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 13(5): 135–48. 1976

RAO, M. S., BHASKAR, G. U., KAREKAL, S. *Estimation of Uniaxial Compressive Strength of Coal Measures of Pranhita-Godavari Valley, India Using Sonic Logs*. 15th Coal Operators' Conference, University of Wollongong, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy and Mine Managers Association of Australia; 36-47. 2015

REYER, D., AND PHILIPP, S.L. *Empirical relations of rock properties of outcrop and core samples from the Northwest German Basin for geothermal drilling*, *Geothermal energy*. *Science*, 2, 21–37, 2014

RICHTER, D., REIDO, J., GARFIELD, R. *NEWMOA Webinar Geophysical Evaluation of Bedrock Drinking Water Wells Understanding the Science*. Hager-Richter Geoscience. Estados Unidos. 2016

SERRA, OBERTO. *Well Logging Handbook*. Paris: Editions TECHNIP, 2008. 609p

SHARMA P.K. AND T.N. SINGH, A. *Correlation between P-Wave velocity, impact strength index, slake durability and Uniaxial Compressive Strength.* Bull Eng. Environ. 2008; 67: 17-22.

SHARMA, M. S. R., O'REGAN, M., BAXTER, C. D. P., MORAN, K., VAZIRI, H., NARAYANASAMY, R. *Empirical relationship between strength and geophysical properties for weakly cemented formations.* Journal of Petroleum Science and Engineering. 2010; 72, 134–142.

SOROUSH, H., QUTOB, H. *Evaluation of rock properties using ultrasonic pulse technique ad correlating static to dynamic elastic constants.* GEOIndia. 2011

SRK CONSULTING. *Comparing Traditional and Televiewer Method of Structural Data Collection.* Presented by Kark Llewelyn. Minex. Astana, 2015

TURGRUL, A., ZARIF, I. H. *Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey.* Eng Geol. 1999; 51:303–317

VALLEY, B., BAHRANI, N. *Optical Televiewer Logging at Foy and Frost Properties for Wallbridge Mining Company.* Sudbury, 2009

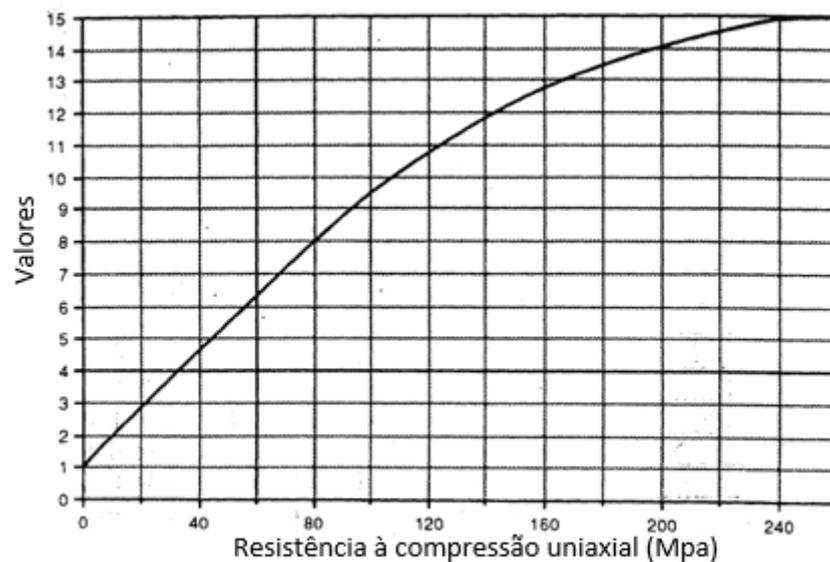
VERNIK L, BRUNO M, BOVBERG C. *Empirical relations between compressive strength and porosity of siliciclastic rocks.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr; 30, 677-680, 1993

WICKHAM G. E., TIEDEMANN H. R. AND SKINNER E. H. *Support determination based on geologic predictions.* In Proc. Conf. Rapid Excavation Tunneling, pp. 43–64. AIME, New York. 1972

APÊNDICE – Tabelas de Conversão RMR

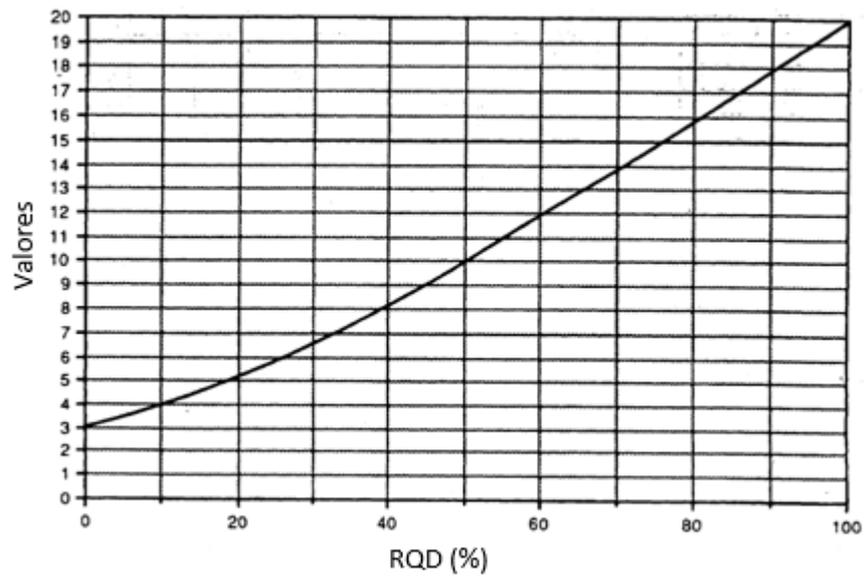
Para a entrada de valores dos três primeiros itens da tabela 5, Bieniawski (1989) criou gráficos que correlacionam os parâmetros solicitados com os pesos que deverão compor a classificação (Tabelas 24-27). Os gráficos são úteis para retirar qualquer tipo de subjetividade na atribuição dos pesos da classificação, diminuindo a variação que há na avaliação feita por um ou outro analista. O gráfico da Tabela 27 é usado na ausência dos dados de RQD ou de descontinuidades, com base nos estudos de Priest e Hudson (1976).

Tabela 25: Correlação de valores de resistência da rocha intacta



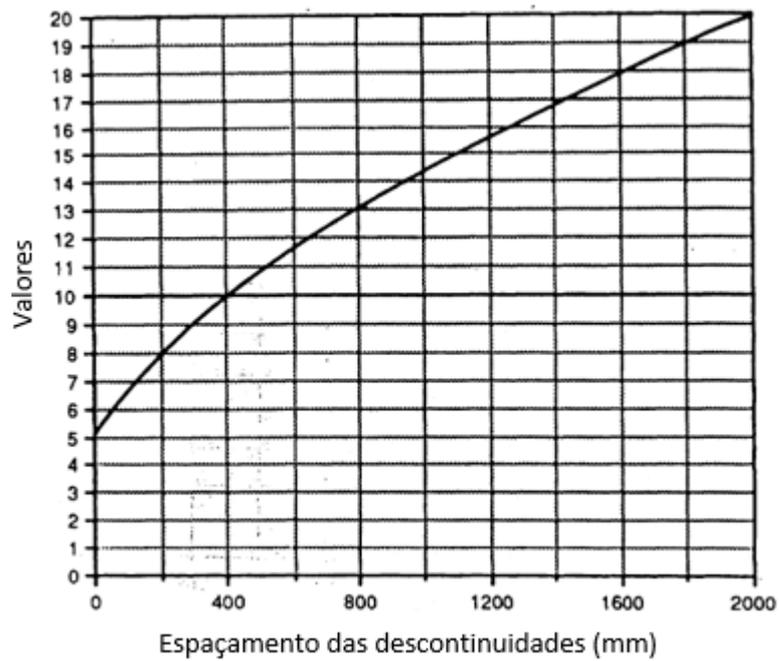
Fonte: Bieniawski, 1989

Tabela 26: Correlação de valores para RQD



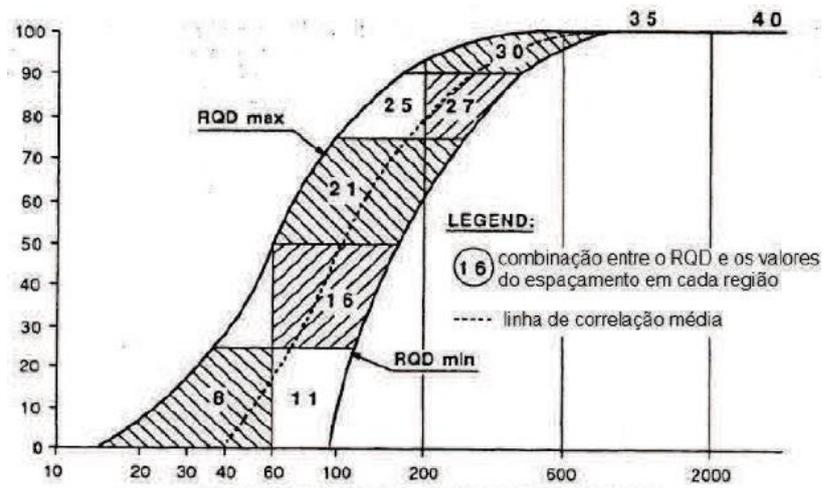
Fonte: Bieniawski, 1989

Tabela 27: Correlação de valores para o espaçamento



Fonte: Bieniawski, 1989

Tabela 28: Correlação entre o RQD e o espaçamento das descontinuidades



Fonte: Bieniawski, 1989